

LÊDA VALÉRIA RAMOS SANTANA

Análise do comportamento da velocidade do vento na região Nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40

RECIFE-PE – FEVEREIRO/2014.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Análise do comportamento da velocidade do vento na região Nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Tatijana Stošić

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Cláudia Helena Dezotti

RECIFE-PE – FEVEREIRO/2014.

Ficha catalográfica

S232a Santana, Lêda Valéria Ramos
Análise do comportamento da velocidade do vento na
região nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40 /
Lêda Valéria Ramos Santana. – Recife, 2014.
46 f. : il.

Orientadora: Tatijana Stošić.
Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística
Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Estatística e Informática, Recife, 2014.
Referências.

1. Re-análise 2. Distribuição 3. Orografia I. Stošić,
Tatijana, orientadora II. Título

CDD 310

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Análise do comportamento da velocidade do vento na região Nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40

LÊDA VALÉRIA RAMOS SANTANA

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 17/02/2014 pela Banca Examinadora.

Orientadora:

Prof.^a Dra. Tatijana Stošić
DEINFO-UFRPE

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Cláudia Helena Dezotti
DEINFO-UFRPE

Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho
DEINFO-UFRPE

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura
DEPA-UFRPE

Dedico, aos meus pais
Jennysson e Silvana, e a minha irmã
Glaúcia.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por está sempre presente na minha vida, guiando meus passos. Mostrando sempre que com fé, conseguimos forças para superar os obstáculos que surgir.

Aos meus pais Jennysson e Silvana, que amo mais que tudo nesse mundo e que, sempre fizeram tudo por mim. Foi tão triste sair de casa, mas essa distância fez com que cada dia aumentasse mais e mais o amor, carinho e respeito que tenho por eles. A minha irmã Gláucia. E os meninos Mel, Marley, Pipo, Lila e Ideli. Amo Vocês!

A toda minha família, minha avó Terezinha, meus tios e tias, primos e primas. Em especial tia Suely e Teodoro. E, aos que já partiram para um mundo que não conhecemos.

As amigas, Fernanda, Barbinha, Vivi, Flávia, Karolly, Vânia, Renata, Andréia, Dani, Li, Izinha, Lúcia e, todos os outros. Encontramos sempre uma forma de estarmos juntas.

Aos amigos do José Fernandes que até hoje estão sempre presentes, Alan, Alice, Kendinho, Andriel, Flávio, Josy e a Alessandra.

A Evelyn, que já faz parte da minha família. A experiência em Recife foi intensa. Tinha dia que a saudade de casa falava mais alto. Você e sua família são muito especiais.

A Thaíze, Samuel, Vida boa (Alessandro), Rodrigo, Filipe, Diego e Lázaro, não existem palavras que possam expressar a gratidão, carinho e o quanto vocês se tornaram especial para mim. Obrigada, meu Deus, por colocar pessoas tão boas na minha vida. Não sei como escrever em tão poucas palavras, porque foram muitos os momentos especiais que ficaram para sempre guardados. A Hérica, que chegou depois, mas que cuidou de mim muito bem. Vocês fizeram toda a diferença na minha vida desde quando cheguei em Recife.

Aos colegas da Biometria, a Luiz Henrique, obrigada por tudo. Ricardo, Ricardão, Barbara, David, Ronaldo, Simara, Rosangela, Paula, Sérgio, Isys, Hélio, Rivellino, Djalma. Professores e funcionários do DEINFO, em especial as professoras Tati-jana e Cláudia.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

“Você não pode mudar o vento, mas pode ajustar as velas do barco para chegar onde quer.”

Confúcio.

Resumo

A distribuição da velocidade do vento depende do relevo de uma determinada região, no caso do Nordeste brasileiro são quatro sub-regiões com características de relevo distintas: Meio-Norte, Sertão, Agreste e Zona da Mata. Entre as distribuições de probabilidade que foram propostas para dados de vento, a distribuição Weibull, Gama Generalizada e a Rayleigh são consideradas as mais apropriadas para modelar a variabilidade da velocidade do vento em muitos locais. Neste trabalho foram analisados dados da ERA-40, durante o período 1958-2001, para verificar que distribuição de probabilidade é mais adequada para descrever a variabilidade temporal da velocidade do vento no NE. A ERA-40 é uma re-análise de observações meteorológica de Setembro de 1958 a Agosto de 2002 produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* em colaboração com muitas instituições. Os dados são produzidos usando diferentes fontes tais como radiossondas, boias oceânicas, satélites e estações meteorológicas. E tem resolução temporal é de 6 h e espacial de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. A distribuição Weibull de dois parâmetros é considerada a melhor para modelar a distribuição de frequência dos dados da velocidade do vento para a maior parte do NE. A faixa litorânea é caracterizada por altas velocidades e baixa variabilidade temporal. Estes resultados podem ser usados para avaliar o potencial eólico do NE e, a influência do vento sobre vários fenômenos ambientais como erosão do solo, precipitação, formação de dunas, dispersão de sementes e poluentes.

Palavras-chave: Re-análise, Orografia, Distribuição.

Abstract

Wind speed distribution depends on relief of a certain region, in the case of Brazilian Northeast (NE) there are four subregions with different characteristics of relief: Atlantic Rainforest zone, Agreste, North-Eastern Backlands and Northeast Mid North. Among probability distributions that were proposed for wind data, Weibull, Generalized Gamma and Rayleigh distributions were found to be most appropriate to model wind speed variability in many locations. In this work we analyze ERA-40 data, during the period 1958-2001, to evaluate which probability distribution is most suitable to describe temporal variability of wind speed in NE. ERA-40 is a re-analysis of meteorological observations from September 1958 to August 2002 produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) in collaboration with many institutions. The data were produced using different sources such as radiosondes, ocean buoys, satellites and meteorological stations, and have temporal resolution of 6h and spatial resolution of $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. The two parameter Weibull distribution is found to be the best for modeling frequency distribution of wind speed data for most of the NE. The coastal zone is characterized by strongest winds and smallest temporal variability. These results can be used to evaluate the wind energy potential at NE and the influence of wind on various environmental phenomena as soil erosion, rainfall, dune formation and dispersion of seeds and pollutants.

Key-words: Re-analysis, Distributions, Orography

Lista de Figuras

Figura 1: Circulação do ar. Fonte: (MB, 1999).	4
Figura 2: Mapa da região NE.	7
Figura 3: Sub-regiões do NE.	7
Figura 4: Circulação da Atmosfera e Ventos predominantes. Fonte: (MB, 1999) ...	11
Figura 5: (a) Mapa do Brasil com pontos abrangendo o NE. (b) Destaque dos pontos sobre o NE.....	18
Figura 6: Séries da velocidade escalar de vento no NE de acordo com as coordenadas espaciais.....	19
Figura 7: Funções densidade da $W - 2P$ para s_0 e k diferentes.....	22
Figura 8: Funções densidade da $W - 3P$ para μ, s_0, k diferentes.	24
Figura 9: Funções densidade da R para s_0 diferentes.	25
Figura 10: Distribuição GG para diferentes valores de s_0, k e ϵ	26
Figura 11: Média (a), desvio padrão (b) da distribuição da velocidade do vento no NE.	29
Figura 12: Assimetria (a) e curtose (b) da velocidade do vento no NE.	30
Figura 13: Ajustes da função de distribuição GG	33
Figura 14: Representação gráfica do ajuste da função de distribuição $W - 2P$	34
Figura 15: Representação gráfica do ajuste da função de distribuição $W - 3P$	34
Figura 16: p -valor espacialmente explícito para as funções de distribuições (a) $W - 2P$, (b) $W - 3P$ e (c) GG ajustadas por meio da estatística do KS	35
Figura 17: Parâmetro de forma $k(a)$ e escala s_0 (b) da distribuição $W - 2P$ espacialmente explícito.	39
Figura 18: Parâmetro de forma $k(a)$, escala s_0 (b) e locação (c) da distribuição $W - 3P$ espacialmente explícito.	40
Figura 19: Parâmetro de forma $k(a)$ e escala $s_0(b)$ e flexibilidade da forma $\epsilon(c)$ da distribuição GG espacialmente explícito.	41

Lista de Tabelas

Tabela 1: Escala de Beaufort (Adaptado (CPTEC, 2012)).	12
Tabela 2: p -valor do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para as distribuições de probabilidade ajustadas.	31
Tabela 3: p -valor do teste de aderência do Qui-Quadrado para as distribuições de probabilidade ajustadas.	32
Tabela 4: Parâmetros estimados das funções de distribuições ajustadas.	37

Lista de Siglas e Abreviaturas

ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA	ECMWF Re-Analysis
ERA-15	A 15-year ERA starting from 1979
ERA-40	A 45-year ERA from September 1957 to August 2002
EUMETSAT	European organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
fdp	Função Densidade de Probabilidade
GG	Distribuição Gama Generalizada
IDW	Inverse Distance Weighting
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Lat.	Latitude
Long.	Longitude
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NE	Nordeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
R	Distribuição Rayleigh
SIG	Sistema
VTPR	Vertical Temperature Profile Radiometer
W-2P	Distribuição Weibull de dois parâmetros
W-3P	Distribuição Weibull de três parâmetros

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
2.1	Objetivo Geral	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	Revisão de Literatura	4
3.1	Clima	4
3.1.1	Clima - Nordeste	6
3.2	Vento	9
3.3	Recurso Eólico	13
4	Dados e Metodologia	17
4.1	Dados	17
4.2	Metodologia	19
4.3	Séries Temporais	20
4.3.1	Qui-Quadrado χ^2	20
4.3.2	Kolmogorov-Smirnov (<i>KS</i>)	21
4.3.3	Distribuição Weibull	21
4.3.4	Distribuição Rayleigh	24
4.3.5	Distribuição Gama Generalizada	25
4.4	Estimação de Máxima Verossimilhança	27
4.5	<i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW)	28
5	Resultados e Discussão	29
6	Conclusão	42
7	Referência	43

1 Introdução

O vento é um elemento meteorológico derivado dos gradientes de pressões atmosféricas que tem sido explorado há décadas por diversos autores (HENNESSEY, 1977; JUSTUS; HARGRAVES; YALCIN, 1976), por meio de funções de distribuição de probabilidade, com a finalidade de descobrir a distribuição que melhor representa o seu comportamento.

A disposição geográfica do Nordeste (NE) brasileiro é favorecida com a intensidade e constância dos ventos Alísios, implicando em condições apropriadas para a exploração desse recurso como alternativa energética. Embora o vento na região possua um ciclo anual bem definido, está sujeito à variabilidade e tem uma intrínseca relação com os fenômenos meteorológicos, tornando imprescindível entender a variabilidade climática (OLIVEIRA; COSTA, 2011).

O NE possui quatro sub-regiões, Meio Norte, Sertão, Agreste e Zona da Mata com características distintas e que afetam no comportamento da velocidade dos ventos. O relevo da região serve de barreira, como também de corredores de ar, que ajudam ou impedem a passagem dos ventos contribuindo para altas ou baixas velocidades.

O vento é uma ferramenta que colabora para melhoria das ações da natureza e humana, uma vez que impulsiona barcos a vela, dissemina sementes, ajuda nas migrações de aves e, tem adquirido importância econômica como fonte de recurso da energia renovável, despertando o interesse de vários países depois da crise do petróleo na década de 70 (ANEEL, 2005).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Brasil realiza medições de vento em diferentes pontos do território nacional e alguns estudos conduzidos por institutos e universidades advertem sobre um imenso potencial eólico ainda não explorado no país. Para avaliar essa informação diversos estudos utilizaram modelos estatísticos com intuito de encontrar o modelo que, melhor se ajuste a distribuição de frequência da velocidade do vento (SILVA, 2004).

O European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (EMCWF) em parceria com outras instituições, fornecem uma malha de dados que cobre todo o mundo com diversas variáveis climáticas como vento, temperatura, precipitação entre outras, pertencente a re-análise ERA-40. A re-análise é um reprocessamento dos

dados por longo período de tempo, muito utilizado em estudos meteorológicos (ECMWF, 2013).

Os dados do *EMCWF* são obtidos de fontes distintas de observações e convertidos para o padrão mundial da Organização Meteorológica Mundial (OMM) antes de ficarem disponível para o público. A re-análise ERA-40 tem registros diários das variáveis compreendendo um período de 45 anos, em uma resolução espacial de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, e temporal de 6h (ECMWF, 2013).

A análise de frequência da velocidade do vento, bem como a identificação do potencial eólico em diversas áreas do planeta tem sido bastante explorada. A distribuição Weibull de dois parâmetros destaca-se entre as funções de distribuição que melhor representa a frequência dos dados de velocidade do vento (KISS; JÁNOSI, 2008; SILVA et al., 2002).

A dissertação está dividida em seis capítulos, neste primeiro capítulo temos uma breve introdução dos estudos sobre o vento no NE. O segundo apresenta os objetivos geral e específico do trabalho. O terceiro, comentamos as características do clima, com destaque para o NE do Brasil. O quarto capítulo abrange os dados e a metodologia que será empregada, bem como as funções de distribuição de probabilidade, e o uso do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008) para realização das análises. No quinto capítulo, descrevemos os resultados obtidos nas análises dos dados da ERA-40. O sexto capítulo contém a conclusão do trabalho.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Analisar dados da re-análise ERA-40, para avaliar as funções de distribuições de probabilidade que melhor se ajustam a distribuição da velocidade de vento na região NE do Brasil.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter dados da re-análise ERA-40, e identificar os pontos de grade que representam o NE do Brasil.
- Verificar as funções de distribuições de probabilidade adequadas para representar os dados da velocidade de vento.
- Estimar os parâmetros das funções de distribuições ajustadas pelo método da máxima verossimilhança.
- Analisar espacialmente o comportamento da velocidade de vento no NE brasileiro.

3 Revisão de Literatura

3.1 Clima

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), as condições médias do comportamento dos elementos atmosféricos como: chuva, temperatura, pressão atmosférica, umidade do ar e ventos, por um período de 30 anos, em uma região denomina-se clima. Tais comportamentos analisados em um dado instante sobre um determinado local, que pode variar de acordo com o dia e as influências que a atmosfera está sofrendo, são chamados de tempo (MOURA et al., 2007).

A atmosfera é formada por uma mistura de gases que constitui o ar, a circulação atmosférica determina o clima de qualquer região e é indispensável à vida. A circulação geral redistribui calor por todo globo, podendo ser descrita por variáveis que caracterizam sua condição energética, não é homogênea provocando assim, variações nos elementos climáticos (FERREIRA; MELLO, 2005).

Na Figura 1, os movimentos atmosféricos em cada hemisfério têm a forma de uma célula de convecção¹. A instabilidade atmosférica provocada pelo aquecimento da superfície aumenta as temperaturas em baixos níveis, logo o ar frio mais denso desce enquanto o ar quente sobe (SILVA, 2003).

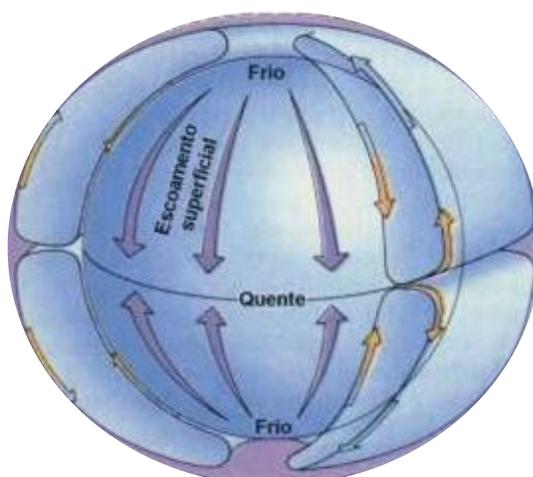


Figura 1: Circulação do ar. Fonte: (MB, 1999).

¹ Fenômeno da dinâmica dos fluidos que ocorre em situações onde existem diferenças de temperatura dentro de um corpo líquido ou gasoso (Transferência de calor na vertical).

Os sistemas climáticos conduzem os movimentos atmosféricos através de diferentes escalas de tempo e espaço. A escala temporal diária das condições meteorológicas está relacionada à variação diária. A variação que abrange uma escala maior de variação das condições meteorológicas diz-se escala temporal anual. De acordo com (SILVA, 2003) as escalas espaciais são:

- **Macroescala** – abrange fenômenos de escala regional ou geográfica, caracterizando o clima de grandes áreas através de fatores geográficos. É bastante utilizada em estudos de mudanças climáticas.
- **Mesoescala** – faz referência aos fenômenos em escala local, onde o relevo define o clima. Usada em planejamento e implantação de um cultivo.
- **Microescala** – compreende os tipos de cobertura do terreno. Logo, dentro de uma microescala pode conter inúmeros microclimas².

O Brasil possui grande extensão territorial com diferentes regimes climáticos e distintas características influenciadas por fatores climáticos naturais ou humanos, que variam em cada região do país. A Zona de Convergência Intertropical ao Norte, as distintas ações exercidas pelo relevo continental, a radiação solar, a ação periódica irregular das massas de ar polares e a extensa faixa litorânea, entre outros, são aspectos que contribuem para a biodiversidade da região (AMARANTE et al., 2001).

A radiação solar está entre os elementos climáticos mais importantes devido à dependência direta ou indireta das outras variáveis climatológicas. O sol distribui energia de forma desigual sobre a terra, formando as correntes oceânicas e os ventos, que transportam calor dos trópicos para os polos, para poder atingir um equilíbrio energético (CARVALHO, 2005).

A massa de ar apresenta-se como um dos fatores mais importante da atmosfera com características uniformes de temperatura e umidade, pois age diretamente sobre as temperaturas e os índices pluviométricos nas diferentes regiões do país. De acordo com Anuário Estatístico do Brasil, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as massas de ar que interferem no Brasil são a Equatoriais e Tropicais, ambas Continentais e Atlânticas, e a Polar Atlântica (CARVALHO, 2005).

²Clima verificado em um ponto restrito (cidade, bairro, rua,...), com condições atmosféricas diferentes da zona exterior devido a topografia, a vegetação, a superfície do solo.

O sistema de classificação climática definido por Koppen é o mais referenciado para estudos meteorológicos, mesmo sofrendo algumas modificações e críticas referentes aos limites térmicos e hídricos dos tipos de climas determinados para diferentes regiões (ROLIM et al., 2007). Baseado nas médias anuais de temperatura e precipitação o clima, segundo Koppen, dividi-se em cinco tipos, designados por letras:

A – Climas tropicais úmidos: A temperatura média mensal é maior que 18° C, conseqüentemente quase todos os meses são quentes. E, o inverno sem características predominantes da estação.

B – Climas secos: Precipitação escassa na maior parte do ano, altos índices de evaporação e transpiração.

C – Climas úmidos de latitudes médias com invernos amenos: Caracterizado por verões intensos e invernos amenos. A temperatura média do mês mais frio varia entre de 18° C e -3° C.

D – Climas úmidos de latitudes médias com invernos severos: No mês mais quente a temperatura média excede 10° C e no mês mais frio fica abaixo de -3° C.

E – Climas polares: Invernos e verões extremamente frios. A temperatura não ultrapassa 10° C.

3.1.1 Clima - Nordeste

O Nordeste brasileiro possui uma extensa área territorial com aproximadamente 1.558.196 km² e a maior costa litorânea do país. O NE está localizado entre os meridianos 48° 05' W a 35° 02' W e paralelos 1° S a 18° 05'S (Figura 2) (VAREJÃO-SILVA, 2006). Limita-se a Norte e a Leste com o Oceano Atlântico, ao Sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a Oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás. Devido a estas características é uma região com quatro grandes domínios geoambientais (Figura 3): Sertão, Zona da Mata, Agreste e Meio Norte ou área de Transição Amazônica (REBOUÇAS, 1997).

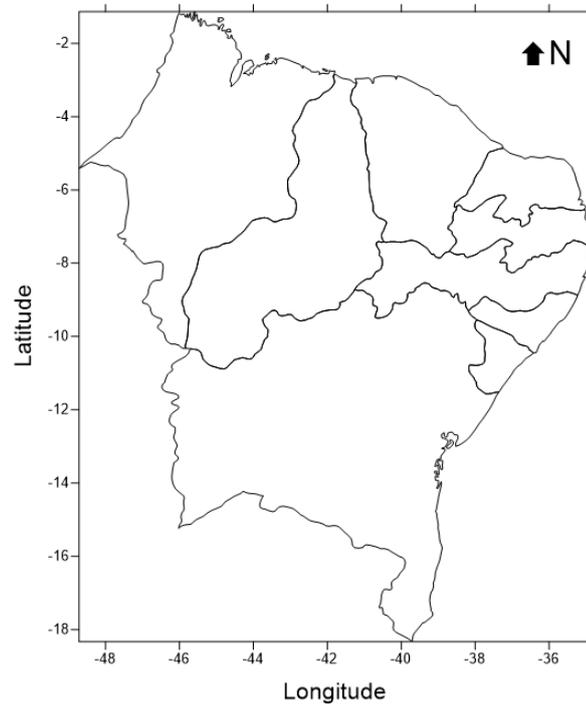


Figura 2: Mapa da região NE.



Figura 3: Sub-regiões do NE.

Meio Norte

Localizada no estado do Maranhão e no Oeste do estado do Piauí, é uma faixa de transição entre a Amazônia e o Sertão nordestino. Tem sua referência pluviométrica entre 1000 e 2500 mm/ano, rios perenes e grande reserva de água subterrânea.

Sertão

Chamado também de semiárido, apresenta altas temperaturas ao longo do ano, índice de pluviosidade baixo, baixa umidade proporcionando clima seco. No Nordeste é conhecido como a área da Seca do NE, que gera prejuízos, principalmente, para a agricultura e pecuária.

Agreste

Representa uma área de transição entre o litoral úmido e o sertão semiárido, na forma de uma estreita faixa, paralela à costa, com pluviometria entre 700 e 1000 mm/ano, sujeita a seca.

Zona da Mata

Situa-se na zona litorânea e abrange do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia. A pluviosidade varia entre 1000 e 3000 mm/ano, as chuvas são bem distribuídas durante o ano todo, embora no verão chova em maior quantidade em função da alta evaporação provocada pelas temperaturas elevadas. O clima é úmido e as temperaturas são mais elevadas no verão do que no inverno. Constitui a área mais urbanizada e industrializada do NE, destacando-se as regiões metropolitanas de Recife e Salvador.

O NE é observado como região semiárida e apresenta precisas variações temporais e espaciais da precipitação pluviométrica, e altas temperaturas ao longo do ano (AZEVEDO, et. al., 1998). Sendo a área um pouco complexa, sofre influências dos sistemas de circulação nomeados Sistemas de Correntes Perturbadas de Sul, Norte, Leste e Oeste.

O NE é influenciado por sistemas de várias escalas como: a Zona de Convergência Intertropical pertencente à escala planetária ou macroescala. E as circulações geradas por anomalias no campo da temperatura da superfície do mar, os anticiclones subtropicais do Atlântico e a oscilação de 30-60 dias, amplamente conhecida como o principal sistema gerador de precipitação sobre o Norte do NE. Enquanto as linhas de instabilidade formadas na costa Norte do NE e circulações geradas por

contraste térmico entre superfícies sólidas e líquidas e entre áreas não elevadas e elevadas referem-se aos sistemas da mesoescala (FERREIRA; MELLO, 2005).

A zona litorânea do Norte-Nordeste está situada entre o extremo Norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte, e é dominada pelos ventos Alísios de Leste e Nordeste que se tornam mais forte quanto mais distante da Depressão Equatorial. As brisas terrestres e marinhas interferem no comportamento do vento uma vez que quanto mais baixos os índices de vegetação e de umidade do solo menor será a fricção dos ventos e maior será a velocidade, podendo gerar ventos médios anuais entre 6 m/s e 9 m/s no litoral da região. Logo, a velocidade do vento diminui à medida que se afasta da costa para o interior, por causa do aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas (AMARANTE et al., 2001).

Entre o Cabo de São Roque (RN) e proximidades do Estado do Rio de Janeiro encontra-se a zona litorânea do Nordeste-Sudeste com registros de velocidades médias anuais de 8 a 9 m/s. Na região da costa brasileira do Rio Grande do Norte até o Rio de Janeiro a velocidade atinge cerca de até 8 m/s, devido ao efeito de compressão vertical do escoamento predominante em larga escala, que é Leste-Nordeste, quando ultrapassa a barreira elevada das serras (AMARANTE et al., 2001).

3.2 Vento

O movimento do ar ocasionado pela associação entre a energia solar e a rotação planetária, a diferença de temperatura e de pressão entre dois locais provocam o movimento horizontal do ar que é o vento. O deslocamento do ar varia de regiões de alta pressão atmosférica, para áreas de pressão inferior, implicando na existência do gradiente de pressão³ que constituem a principal força motriz dos movimentos de ar (AMARANTE et al., 2001).

³ O gradiente de pressão é a maior taxa de variação da pressão com a distância.

Os ventos são muitas vezes expressos de acordo com a sua força e a direção e, sofre o efeito Coriolis⁴ defletindo-se para esquerda no hemisfério Sul, e para direita no hemisfério Norte, originando os ventos predominantes em cada faixa de latitude, exceto na linha do equador (ROSA; TIAGO FILHO, 2007).

A força por unidade de massa atuante sobre uma parcela de ar, decorrente de um gradiente de pressão, pode ser expressa vetorialmente pela equação (1):

$$\frac{F_p}{m} = -\frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (1)$$

onde F_p é a força de pressão, ρ é a densidade, m é a massa e ∇p é o gradiente de pressão.

A velocidade, direção, força e frequência de calmaria são as principais características do vento que sofre a influência da orografia, obstáculos naturais e artificiais junto ao solo. A direção de onde o vento sopra denomina-se barlavento, e o lado para onde ele vai se chama sotavento. O vento é designado pelo ponto cardinal situado a barlavento aceitando geralmente, as oito direções fundamentais: Norte - N, Nordeste - NE, Leste - E, Sudeste - SE, Sul - S, Sudoeste - SW, Oeste - W e Noroeste - NW (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980)

Ventos Alísios do NE e do SE (Figura 4) são originados entre os Trópicos e o Equador em baixas altitudes. Na região equatorial, os ventos Alísios dos dois hemisférios convergem formando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), conhecida como o principal sistema gerador de precipitação sobre o Norte do NE. A posição e a intensidade da ZCIT são influenciadas pelos padrões da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre a bacia do oceano Atlântico. Nos meses de março-abril atinge sua posição mais ao Sul (CORREIA, et al., 2000).

⁴ Força aparente devido ao movimento de rotação da Terra que muda a trajetória da massa de ar sem modificar sua velocidade. A força de Coriolis é sempre perpendicular à direção do movimento. Isso explica porque os redemoinhos giram em sentidos diferentes nos dois hemisférios. É a força de Coriolis que determina o movimento rotatório dos sistemas atmosféricos (ciclones, anticiclones, tornados, furacões).

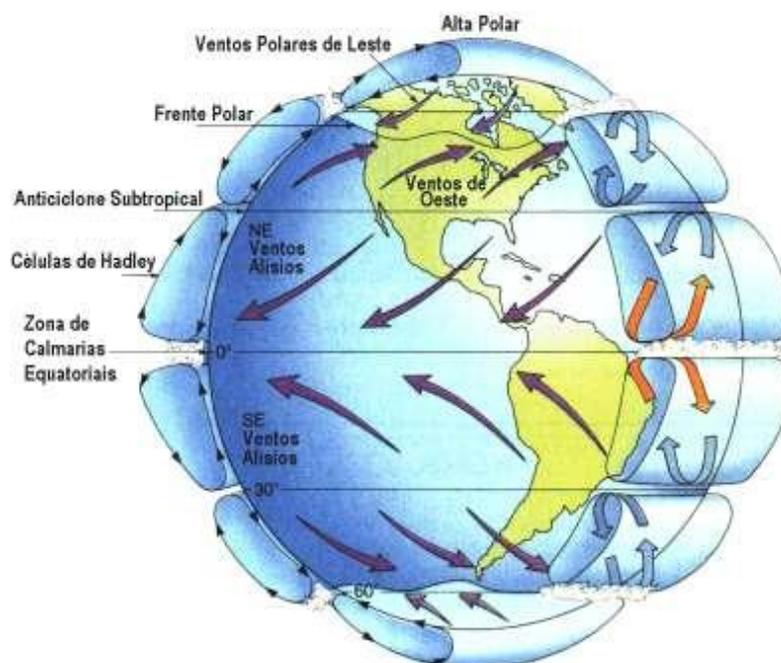


Figura 4: Circulação da Atmosfera e Ventos predominantes. Fonte: (MB, 1999)

Os ventos de Oeste (Figura 4) são gerados entre os Trópicos e as regiões subpolares e apresentam forte variação na intensidade dos ventos. Situam-se entre as latitudes de 30° e 60° tanto no hemisfério Norte como no hemisfério Sul, enquanto os ventos de Leste sopram dos polos para zonas temperadas, na movimentação para o Equador, encontram-se com os ventos de Oeste, mais quentes, e formam uma região descontínua, a frente polar, que também apresentam variações de velocidades superiores aos ventos Alísios (SILVA, 2003).

Os fenômenos El Niño e La Niña são anomalias do sistema climático, com consequências no tempo e no clima em todo o planeta, ocasionando mudanças da circulação da atmosfera. O evento intercala em média de quatro anos por condições normais, porém o início e o fim deste fato são determinados pela dinâmica do sistema oceano-atmosfera persistindo de 6 a 15 meses (CPTEC, 2012).

Devido a sua importância econômica e ambiental a variável vento é bastante explorado por diversos autores (SANTOS et al, 2012; ARAÚJO, 2012) na busca do entendimento do seu comportamento e da sua relação com outras variáveis. Assim como a influência das componentes zonal e meridional do vento nos sistemas meteorológicos.

A escala de Beaufort (Tabela 1) baseada na Força ou Número de Beaufort criada e por Sir Francis Beaufort (1777-1857), hidrógrafo da Marinha Real Britânica, possui um sistema para calcular e informar a velocidade do vento. O sistema é composto da velocidade de vento, um termo descritivo, e os efeitos visíveis sobre as superfícies da Terra ou do mar (INMET, 2013). A unidade de medida da velocidade do vento pode ser em m/s^1 , km/h^1 , ou Knots (kt), sendo que um knot corresponde a uma milha náutica (1852 m) por hora.

Tabela 1: Escala de Beaufort (Adaptado (CPTEC, 2012)).

Número de Beau- fort	Descrição	CrITÉrios de apreciação na terra	Velocidade do vento (m/s)
0	Calmaria	A fumaça eleva-se verticalmente.	0 – 0,4
1	Ar leve	O vento inclina a fumaça, mas não faz girar o cata-vento.	0,5 – 1,5
2	Brisa leve	As folhas se movem e o vento é sentido no rosto.	1,6 – 3,4
3	Brisa suave	As folhas e os ramos pequenos se movem continuamente	3,5 – 5,5
4	Brisa moderada	O vento levanta o pó e as folhas. Os ramos se agitam.	5,6 – 8,0
5	Brisa fraca	Pequenas árvores começam a balançar.	8,1 – 10,9
6	Vento forte	Os ramos grandes se movem. Os fios elétricos vibram. Dificuldade em se usar o guarda-chuva.	11,4 – 13,9
7	Temporal moderado	As árvores se agitam. Há um incômodo em andar contra o vento.	14,1 – 16,9
8	Temporal	Rompem-se os ramos pequenos das árvores. Difícil andar contra o vento.	17,4 – 20,4
9	Temporal forte	Os ramos médios das árvores se quebram.	20,5 - 23,9
10	Temporal muito forte	As árvores são arrancadas e danos são espalhados.	24,4 – 28,0
11	Tempestade	Destroços extensos. Tetos arrancados, etc.	28,4 – 32,5
12	Furacão	Produz efeitos devastadores.	32,6 – 60,0

3.3 Recurso Eólico

A energia gerada pelos ventos é utilizada no mundo há milhares de anos, no princípio utilizava-se para bombeamento de água em atividades agrícolas, moagem de grãos, entre outras atividades que envolvem a energia mecânica. No século XIX foi também utilizada como fonte de energia elétrica, sendo impulsionada na década de 70 pela crise internacional do petróleo (ANEEL, 2005).

A Dinamarca foi o primeiro país com turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública (ANEEL, 2005). O Brasil é considerado o maior produtor de energia eólica quando comparado aos países da América Latina e do Caribe. A primeira turbina eólica foi instalada em junho de 1992, na ilha de Fernando de Noronha. Em 2003, implantou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) impulsionando a produção de energia eólica no país (MMA, 2013).

A disponibilidade de energia no vento está de acordo com as estações do ano, as horas do dia, a topografia, a rugosidade do solo. (RAMOS; SEIDLER, 2011). A avaliação do potencial eólico de uma região exige trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos. Para ser tecnicamente aproveitável, a energia eólica deverá apresentar densidade maior ou igual a 500 W/m², a uma altura de 50 m, admitindo uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (GRUBB; MEYER, 1993). A densidade da potência do vento $P(v)$ é diretamente proporcional à velocidade cúbica média do vento e obtida pela equação (2) (SILVA, 2003).

$$P(v) = \frac{1}{2} * \rho * v_m^3. \quad (2)$$

Sendo ρ a massa específica do ar e v_m a velocidade média.

As instalações das turbinas são feitas no solo, passando previamente por diversos testes de compactação medindo as condições de instalação de cada turbina. Nestes locais a operação e manutenção de parques eólicos provocam um índice de contaminação por resíduo líquido baixo, preservando o lençol freático. Para instalação no mar têm-se usinas *offshore* que são vantajosas devido aos ventos mais for-

tes e mais constantes decorrentes ausência de barreiras físicas como vegetação, montanhas ou prédios (MMA, 2013).

A análise de séries temporais com objetivo de investigar o mecanismo gerador da série temporal, além de fazer previsões de valores futuros, descrever o comportamento da mesma e procurar periodicidades relevantes nos dados.

Um modelo que descreve uma série não conduz, necessariamente, a um procedimento (ou fórmula) de previsão. Sendo necessário especificar uma função-perda, além do modelo. Uma função-perda, que é utilizada frequentemente, é o erro quadrático médio, embora em algumas ocasiões, outros critérios ou funções perdas sejam mais apropriados (MORETTIN; TOLOI, 2006).

As séries temporais são compostas por quatro elementos:

1. Tendência: verifica o sentido de deslocamento da série ao longo de vários anos.
2. Ciclo: movimento ondulatório que ao longo de vários anos tende a ser periódico.
3. Sazonalidade: movimento ondulatório de curta duração, em geral, inferior a um ano; associada, na maioria dos casos, a mudanças climáticas.
4. Ruído aleatório ou erro: compreende a variabilidade intrínseca aos dados e não pode ser modelado.

Testes de aderência são usados para verificar se os dados amostrais se ajustam a uma determinada distribuição de probabilidade escolhida. Os testes de Lilliefors, Shapiro-Wilk, Anderson Darling, são usados normalmente para testar se os dados seguem uma distribuição normal. Para testar a aderência dos dados a uma determinada distribuição, além da distribuição normal, usa-se a estatística do Qui-Quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS), ambos aplicados em amostras grandes e em distribuições contínuas (JOHNSON, 2000).

Na aplicação dos testes verifica-se a hipótese dos dados seguirem determinada distribuição, considerando o nível de significância (α) ser igual a 5%, e o p -valor ser $\geq \alpha$. Então, considerando uma amostra aleatória (x_1, \dots, x_n) de uma população X com Função Densidade de Probabilidade (fdp) desconhecida, testa-se as hipóteses, dada na equação (3):

$$\begin{aligned} H_0: f(x) &= f_0(x) \\ H_1: f(x) &\neq f_0(x)' \end{aligned} \quad (3)$$

onde f_0 é a função densidade de probabilidade, H_0 a hipótese de nulidade e H_1 a hipótese alternativa.

Muitos estudos têm sido publicados na literatura científica empregando as fdp para realizar o ajuste aos dados da distribuição da velocidade do vento, como a Weibull, Gama Generalizada, Rayleigh (CARTA, et al, 2009). Estas distribuições têm por finalidade inferir com que a probabilidade em determinado evento possa ocorrer novamente. Estes estudos tiveram impulso com a crise do petróleo de 1970, que despertou o interesse em formas de energia alternativa (ANEEL, 2005).

A função de distribuição Weibull é amplamente utilizada devido a grande variedade de formas. Possui uma propriedade básica, a sua função de taxa de falha é monótona, isto é, ela é crescente, decrescente ou constante. Na literatura sobre potencial eólico e outras fontes de energia renováveis, é considerada a mais aceita em estudos de velocidade do vento, estando inclusive incluída na legislação da energia eólica. Além de, ser referenciada em vários livros relacionados a este tipo de estudo (CARTA, et al., 2009; JUSTUS, et al, 1976; SILVA et al., 2002; SOUZA, et al., 2010).

A distribuição Weibull teve entre suas primeiras aplicações a análise dos registros da velocidade do vento em dados de mais de cem locais dos Estados Unidos (JUSTUS, et al., 1976), proporcionando o melhor ajuste aos dados de distribuição de frequências da velocidade do vento naquelas localidades.

Dentre as distribuições de probabilidade frequentemente utilizadas em estudo da velocidade do vento têm-se a distribuição Gama, Inversa Gaussiana, Log-Normal, Rayleigh, descrevendo o comportamento dessa variável em regiões com comportamentos diferentes.

A estimação dos parâmetros de uma fdp dar-se por meio de diferentes métodos como o método dos Mínimos Quadrados, Momentos, Máxima Verossimilhança, k -ésimo momento. Logo de acordo com os dados e os resultados desejados aplica-se um dos métodos. Estudo de velocidade do vento utiliza métodos distintos, pois há boas estimativas para locais diferentes feitos por diferentes métodos (CARTA, et al, 2009).

YU et. al. (2008), utiliza os métodos de Momentos e Máxima Verossimilhança para estimar os parâmetros da distribuição Weibull na modelagem e simulação da

velocidade do vento e produção de energia de uma torre no centro dos EUA. Os métodos testados apresentam resultantes semelhantes.

A análise espacial admite a abrangência da distribuição dos dados de um determinado fenômeno ocorrido em uma região específica, contribuindo para a solução de questões relevantes em diversas áreas do conhecimento. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem o uso de dados georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e representados por uma projeção cartográfica, dando suporte nas produções de mapas das análises espacial (DRUCK et al., 2004).

Os problemas de análise espacial utilizam dados ambientais ou socioeconômicos, que serão precedidos de uma análise exploratória associada à representação gráfica e mapas. Os valores amostrais são funções da sua posição no espaço, levando em consideração a posição relativa dos pontos amostrados. Logo, a similaridade entre os valores é quantificada em função da distância entre as amostras (LANDIM, 2003).

De acordo, com Druck et. al. (2004) os dados podem assumir algumas características, considerando o tipo de dados a ser analisado:

Eventos ou Padrões Pontuais são fenômenos identificados como pontos localizados no espaço. Como por exemplo, ocorrência de doenças e espécies de vegetais.

Superfícies Contínuas são frequentemente geradas a partir do levantamento de recursos naturais, incluindo mapas geológicos, topográficos, ecológicos, fitogeográficos e pedológicos, suas amostras podem estar regularmente e irregularmente distribuídas.

Áreas com Contagens e Taxas Agregadas são dados associados a censos e que referem-se a indivíduos localizados em pontos específicos do espaço.

Após encontrar os pontos a serem analisados surge à necessidade de um método que possa inferir sobre os locais que não foram amostrados. Então, utiliza-se das técnicas de interpolação para suprir este empecilho.

A interpolação espacial busca representar superfícies contínuas por meio de amostras pontuais. Logo existem muitas técnicas de interpolação algumas classificadas como determinísticas (*Trend surface analysis, Inverse distance weighting, Local polynomial interpolation, Thin plate spline*) e outras como estocástica (*Kriging e Cokriging*) (LUO, et al., 2008).

4 Dados e Metodologia

4.1 Dados

A ERA-40 é uma re-análise de observações meteorológicas que busca melhorar a precisão dos mapas climáticos históricos possibilitando uma análise mais detalhada dos vários sistemas meteorológicos, abrangendo um período onde se observam uma severa falta de dados. Este banco utiliza-se das mudanças dos sistemas observacionais e os recursos computacionais disponíveis. É uma segunda geração da re-análise abrangendo um período de 45 anos, sendo a primeira a ERA-15 que cobria um período de 15 anos (1979-1992).

As observações da ERA-40 pertencem a ECMWF sendo complementada por arquivos da NCEP e pela Agência de Meteorologia do Japão. Várias instituições colaboraram com o projeto, tais como EUMETSAT, VTPR, NASA, NOAA, entre outras. Logo há diferentes fontes de observações meteorológicas como, radiossondas, boias oceânicas, aviões, satélites, escaterômetros⁵. Contudo, todos os dados convencionais ou de satélites são convertidos para o formato padrão FM 94 BUFR da OMM, e organizados de tal maneira que se constatou a duplicidade de informações, sendo estas extraídas entre outras verificações básicas que garantiram a veracidade da ERA-40 (UPPALA et al., 2005).

Os registros diários de 6 em 6h é realizado pelo sistema de assimilação de dados 3D-Var, devido ao alto custo computacional provocado pelo 4D-Var⁶ que obtinha registros com intervalos de 12h. Embora o sistema de assimilação 3D-Var tenha resolução menor, ainda assim é maior do que o utilizado na ERA-15 (UPPALA et al., 2004).

Os dados da re-análise ERA-40 estão disponíveis no endereço eletrônico http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/ (ECMWF, 2013) em formato *.grib

⁵ Satélite de monitoração terrestre que fornece informações de velocidade e direção do vento nos oceanos para a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)

⁶ Processo de assimilação de dados por meio de observações reais, onde ocorrem ciclos de análise e as observações são combinadas com resultados de um modelo numérico para produzir uma análise, melhor que a do estado atual do sistema (KAWABATA et al., 2011).

para diversas variáveis de caráter ambiental. Os dados correspondem ao período de 01 de janeiro de 1958 a 31 de dezembro de 2001, com registros diários, em m/s, realizados nas quatro principais horas sinóticas diárias (00 h, 06 h, 12 h, 18 h). As variáveis encontram-se a 10 m acima do solo com uma resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (lat./long.).

As análises serão restritas a área geográfica que corresponde à região NE do Brasil (Figura 5), compreendendo 72 pontos de grade localizados entre os meridianos $48^\circ 05' W$ a $35^\circ 02' W$ e paralelos $1^\circ S$ a $18^\circ 05' S$. A variável analisada será obtida pela velocidade escalar,

$$s = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (4)$$

onde as variáveis zonal u e meridional v representam a direção do vento respectivamente no sentido O-L e N-S, que encontram-se disponíveis na ERA-40.

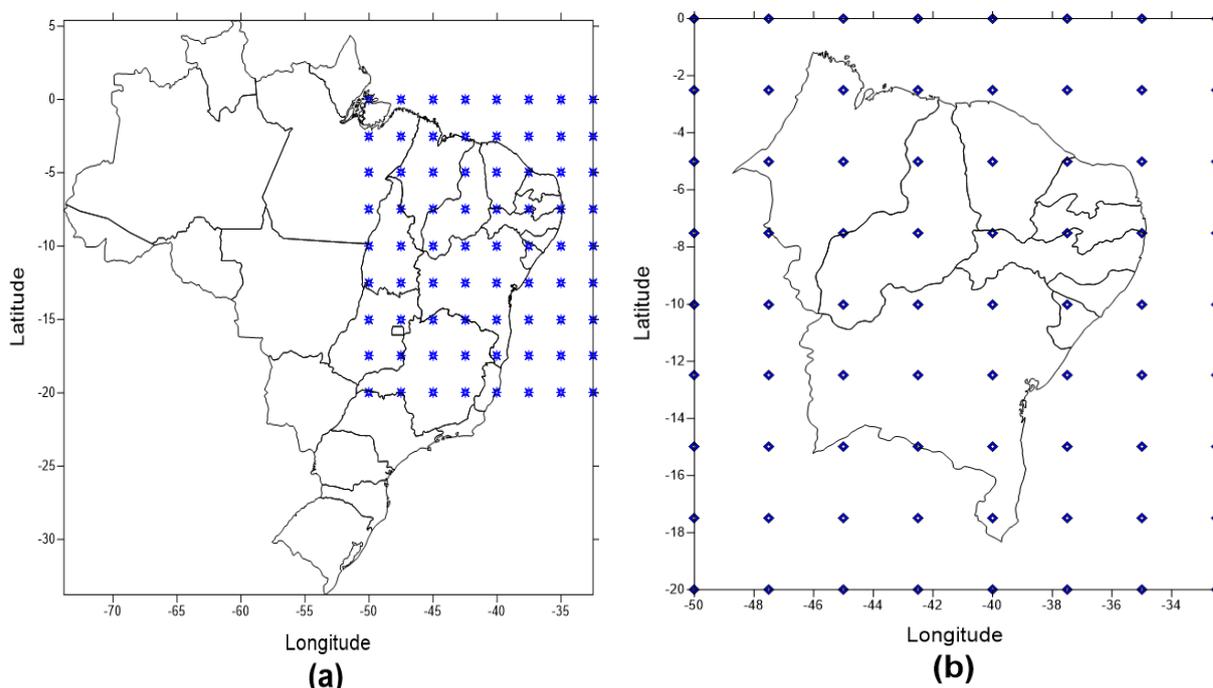


Figura 5: (a) Mapa do Brasil com pontos abrangendo o NE. (b) Destaque dos pontos sobre o NE.

A Figura 6 apresenta quatro dentre as 72 séries da velocidade escalar do vento na região NE do Brasil, mostrando um comportamento diferenciado para mesma latitude e diferentes longitudes.

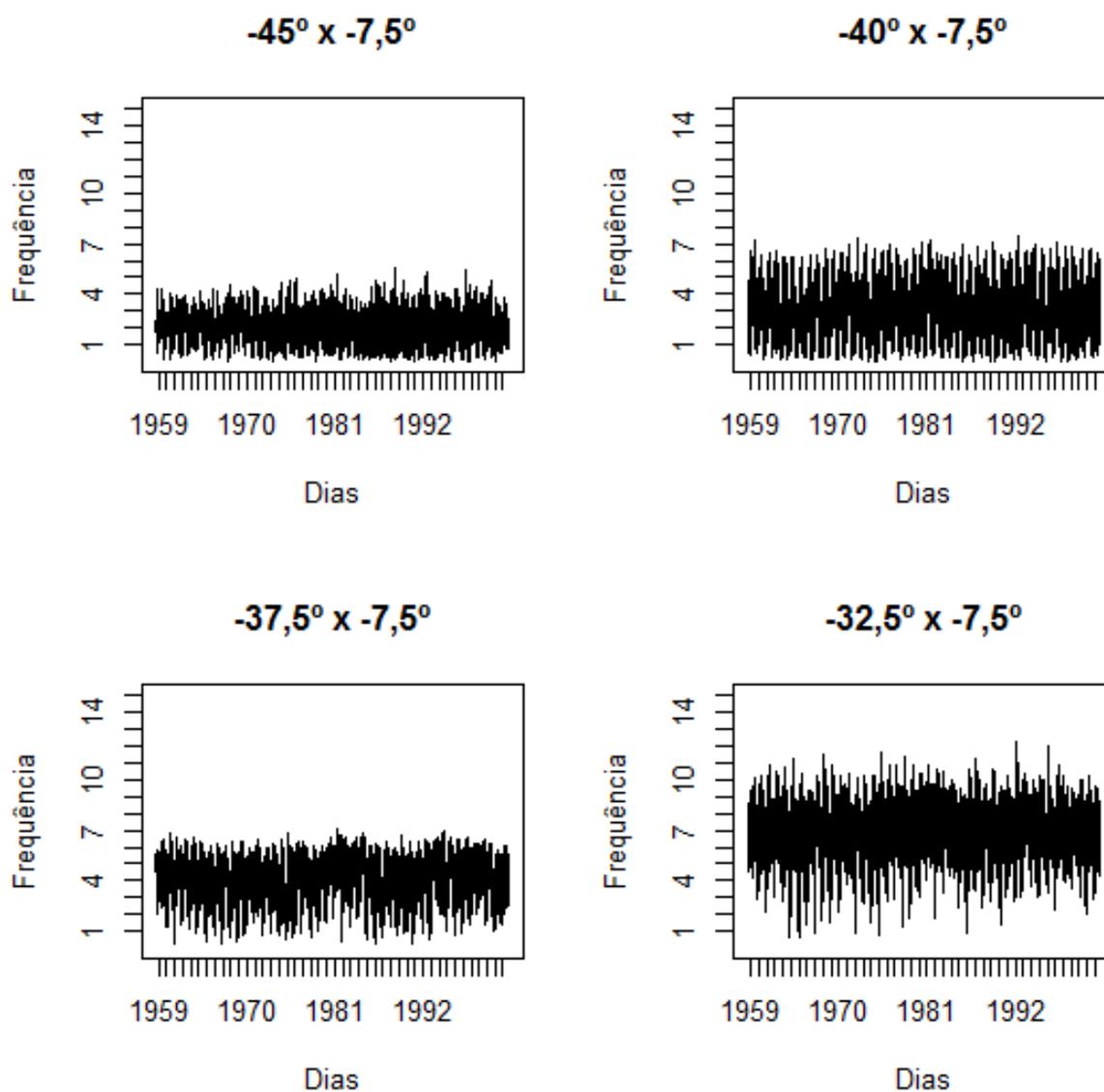


Figura 6: Séries da velocidade escalar de vento no NE de acordo com as coordenadas espaciais.

4.2 Metodologia

Os dados estão em arquivo *.grib de leitura complexa sendo então transformado para o formato *.dat e lido no software R-project (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008), onde foram identificadas as coordenadas e suas respectivas informações de registros diários feitas de seis em seis horas durante os 44 anos de observações (1958-2001). Para cada ponto de grade foram feitas as análises estatísticas

visando fazer inferências a respeito do comportamento do vento na área do NE correspondente a cerca de 1 558 196 km².

Através da média global das observações foram feitas análises espaciais usando mapas, onde suas interpolações foram baseadas no IDW ($p = 2$). Por meio dos testes de aderência identificaram-se as fdp, e a estimação dos parâmetros foi realizada através do método da Máxima Verossimilhança. Para o cálculo das análises utilizou-se o software R.

4.3 Séries Temporais

Segundo (MORETTIN; TOLOI, 2006), uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, equação (5). Os dados foram coletados sequencialmente ao longo do tempo, esperando-se assim que os mesmos apresentem correlação seriada no tempo.

$$X_t = \{x_t \in R | t = 1, 2, \dots, N\}, \quad (5)$$

onde t é o índice cronológico e N é número de observações.

4.3.1 Qui-Quadrado χ^2

O Qui-quadrado é um teste estatístico não paramétrico que mede se um conjunto de dados refere-se a uma população definida por uma distribuição específica. Portanto, se as discrepâncias entre as frequências observadas e as esperada podem ser atribuídas ao acaso, à estatística do teste é dada pela equação (6) (JOHNSON, 2000):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (6)$$

onde n é o número de classes utilizada, O_i é a frequência observada no i –ésimo intervalo e E_i é dado por,

$$E_i = (F(Y_u) - F(Y_l)), \quad (7)$$

em que F é a função de distribuição acumulada com Y_u e Y_l sendo os valores superiores e inferiores da classe i e N o tamanho da amostra. Ou seja, a frequência esperada é calculada por meio da função de distribuição acumulada.

A hipótese de nulidade diz que os dados de uma população com uma distribuição específica é aceita se o p -valor encontrado for maior ou igual ao nível de significância considerado. O χ^2 é uma estatística que se mostra eficaz para um grande número de amostra.

4.3.2 Kolmogorov-Smirnov (*KS*)

O teste de Kolmogorov-Smirnov, assim como o Qui-Quadrado, verifica se uma amostra pode ser proveniente de uma população com uma distribuição específica. A vantagem do teste *KS* em relação ao χ^2 é que o primeiro pode ser usado em pequenas amostras, além de ser mais eficiente que o χ^2 para alguns tamanhos de amostra (JOHNSON, 2000).

A estatística do teste é obtida através da máxima diferença entre a frequência acumulada estimada e a observada:

$$D = \text{Max}(F(X) - S(X)) \quad (8)$$

onde, $F(X)$ é a frequência estimada e, $S(X)$ é a frequência observada.

4.3.3 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull foi proposta por Waloddi Weibull (1954) é usada em estudos de tempo de vida e previsão de falhas de equipamentos, apresentando um

bom ajuste à distribuição de frequência dos dados de velocidade do vento (JUSTUS, et al., 1976). A escolha desta distribuição está relacionada à sua flexibilidade e a estimação de apenas dois parâmetros.

A função de densidade de probabilidade e função de distribuição acumulada da Weibull de dois parâmetros ($W - 2P$), e é expressa respectivamente nas equações (9) e (10):

$$f_W(s; s_0, k) = \left(\frac{k}{s_0}\right) * \left(\frac{s}{s_0}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^k\right], \quad (9)$$

$$F_W(s; s_0, k) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^k\right], \quad (10)$$

onde, $k, s_0 > 0$, $0 \leq s < \infty$. Sendo k o parâmetro de forma (adimensional), s_0 o parâmetro de escala (dimensão de velocidade), s a variável aleatória velocidade do vento. Na Figura 7, temos a representação da Weibull para valores de k, s_0 diferentes.

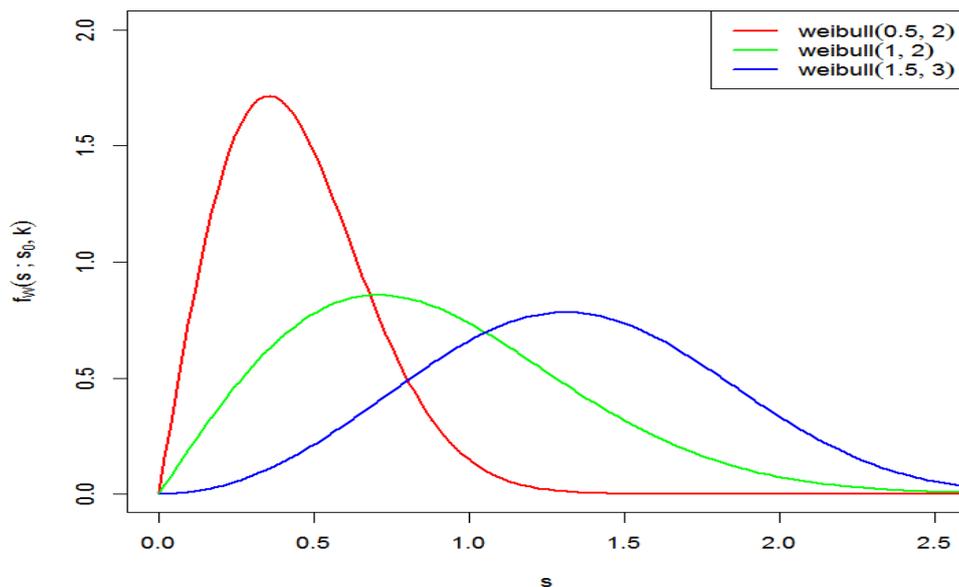


Figura 7: Funções densidade da $W - 2P$ para s_0 e k diferentes.

Em relação aos parâmetros da Weibull observamos que k é inversamente proporcional à variância da velocidade do vento em torno da média, ou seja, quanto maior os valores de k menor a variância e vice-versa (HENNESSEY, 1977; JUSTUS; HARGRAVES; YALCIN, 1976). Quanto maior a constância do vento, maior é o fator de forma e mais concentrado é o gráfico, ou seja, mais estreita e mais pontuda é a curva. O fator de escala s_0 está relacionada com a média.

A média e a variância da distribuição Weibull são dadas respectivamente nas equações (11) e (12):

$$\bar{s} = s_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right), \quad (11)$$

$$\sigma^2 = s_0^2 \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^2 \right\}, \quad (12)$$

onde, Γ é o fator de correção da função Gama.

A distribuição Weibull possui casos particulares, quando seu parâmetro de forma é $k = 1$ tem-se uma distribuição exponencial e, para $k = 2$ tem-se a distribuição Rayleigh. Uma generalização da Weibull de dois parâmetros é a Weibull de três parâmetros ($W - 3P$) equação (13), sua fdp é dada por

$$f_{W3P}(s; \mu, s_0, k) = \left(\frac{k}{s_0} \right) * \left(\frac{s - \mu}{s_0} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{s - \mu}{s_0} \right)^k \right], \quad (13)$$

$\mu > 0$ é o parâmetro de localização, $\mu > 0$, aumenta o pico da Weibull horizontalmente (KISS; JÁNOSI, 2008).

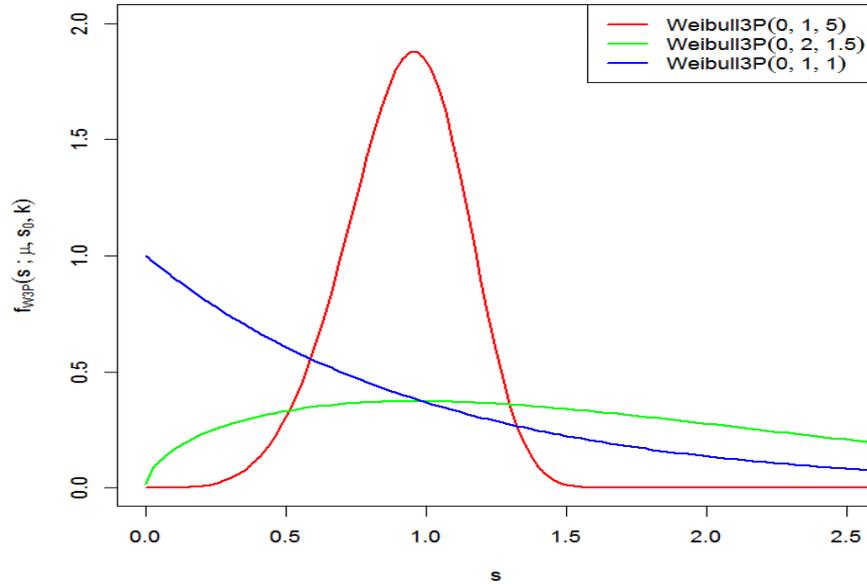


Figura 8: Funções densidade da $W - 3P$ para μ, s_0, k diferentes.

4.3.4 Distribuição Rayleigh

Introduzida pelo físico Lord Rayleigh no final do século XIX a distribuição Rayleigh é um modelo que descreve bem a distribuição escalar da velocidade do vento. Supõe que os componentes ortogonais u e v sejam independentes e identicamente distribuídos (iid) (KISS; JÁNOSI, 2008). É um caso particular da Weibull quando $k=2$ e, apresenta apenas um parâmetro, o parâmetro de escala s_0 (m/s). A fdp é dada por

$$f_R(s; s_0) = \frac{2}{s_0} \left(\frac{s}{s_0}\right) \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^2\right]. \quad (14)$$

A função de densidade acumulada é definida por

$$F_R(s; s_0) = \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^2\right], \quad (15)$$

$$s_0 > 0, 0 \leq s < \infty.$$

A variável aleatória velocidade do vento é representada por s . Quanto à independência dos componentes ortogonais, pode-se testá-los através do coeficiente de correlação equação (16),

$$r_{uv} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{(n-1)\sigma_u\sigma_v}, \quad (16)$$

onde, \bar{u} e \bar{v} representam o valor médio e σ_u e σ_v o desvio padrão.

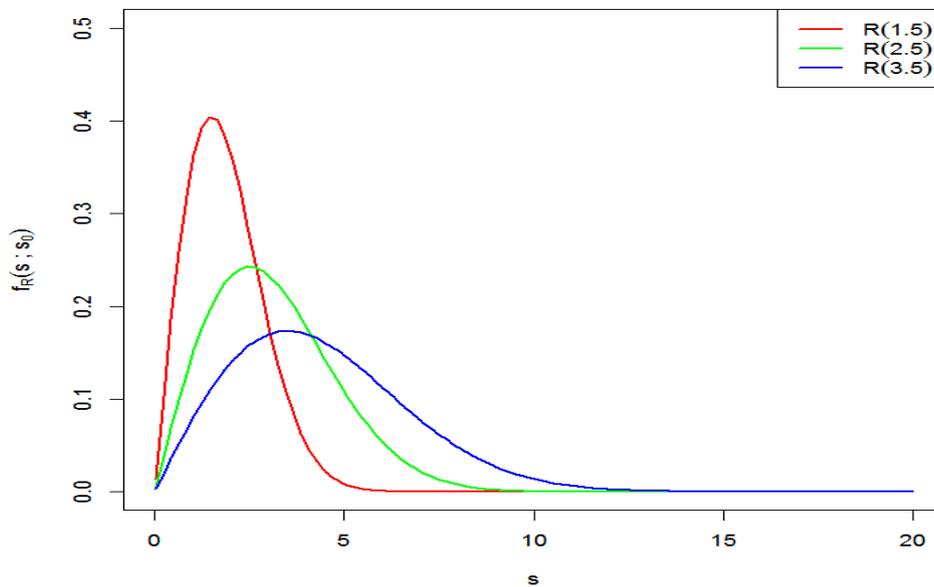


Figura 9: Funções densidade da R para s_0 diferentes.

4.3.5 Distribuição Gama Generalizada

A distribuição Gama Generalizada (GG) é bastante favorável na análise de sobrevivência, e pelo fato da Weibull apresentar algumas restrições no parâmetro de forma, k , em ambas as caudas, a equação da Weibull pode ser generalizada obtendo-se assim uma GG (STACY, 1962),

$$F_{GG}(s; s_0, k, \varepsilon) = \frac{k}{s_0 \Gamma(\varepsilon)} \left(\frac{s}{s_0}\right)^{\varepsilon k - 1} \exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^k\right], \quad (17)$$

onde $s_0 > 0$, k é um inteiro positivo e $0 \leq s < \infty$.

Na equação (17) k é o parâmetro de forma, s_0 o parâmetro de escala e, o $\Gamma(\varepsilon)$ fator de correção Gamma (necessário para a normalização), e o novo parâmetro, ε (melhora a flexibilidade do parâmetro de forma). Casos especiais da distribuição GG são considerados quando, $\varepsilon \equiv 1$ (distribuição Weibull), $k \equiv 1$ (distribuição Gama), $\varepsilon \rightarrow \infty$ (distribuição Log-Normal) e $k \equiv 2$ (subfamília da GG , a distribuição Normal Generalizada) (KISS; JÁNOSI, 2008).

A Figura 10 mostra a curva da função de distribuição da GG para diferentes valores de s_0, k e ε .

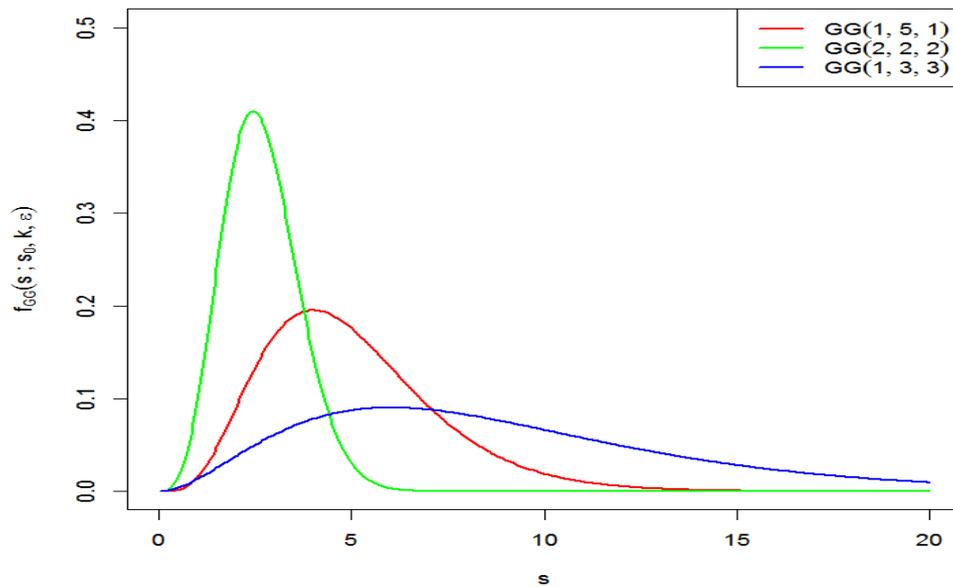


Figura 10: Distribuição GG para diferentes valores de s_0, k e ε .

Uma propriedade importante das distribuições GG é que a família é fechada sob a possibilidade de transformações de energia. Isto é, se $s > 0$ obedece $F(s; s_0, k, \varepsilon)$, em seguida, a fdp correspondente para $z = s^p$ tem a forma $F(z; s_0^p, \frac{k}{p}, \varepsilon)$. Esta propriedade pode ser imediatamente explorada para estimar o potencial de energia eólica, uma vez que é proporcional ao cubo da velocidade do vento, s^3 (KHODABIN; AHMADABADI, 2010).

4.4 Estimação de Máxima Verossimilhança

A Máxima Verossimilhança é um método para estimação dos parâmetros de uma função de distribuição, considerado o mais preciso, com seus estimadores obtidos a partir da maximização da função de verossimilhança. Logo, tendo uma amostra aleatória de tamanho n de uma variável aleatória X com função de densidade de probabilidade $f(x/\theta)$, a função de verossimilhança de θ é expressa na equação (18) (BOLFARINE; SANDOVAL, 2010):

$$L(\theta; x) = \prod_{i=1}^n f(x_i/\theta). \quad (18)$$

Na equação (9) L é função de θ e representa um único parâmetro ou um vetor de parâmetros. O logaritmo natural da função de verossimilhança de θ e o estimador de Máxima Verossimilhança é dado respectivamente pelas equações (19) e (20):

$$l(\theta; x) = \log L(\theta; x), \quad (19)$$

$$l'(\theta; x) = \frac{\log L(\theta; x)}{\partial \theta} = 0. \quad (20)$$

No entanto para se concluir que a solução da equação (20) é um ponto de máximo, é necessária verificação da equação (21),

$$l''(\hat{\theta}; x) \frac{\partial^2 \log L(\theta;)}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=\hat{\theta}} < 0. \quad (21)$$

Os estimadores de máxima verossimilhança possuem duas propriedades importantes, o princípio da invariância e a propriedade de que para amostras grandes os estimadores são eficientes e não viciados.

4.5 Inverse Distance Weighting (IDW)

O Inverse Distance Weighting (IDW) é um método de interpolação proposto por (SHEPARD, 1968) que combina a ideia de proximidade, supondo que pontos mais próximos são mais semelhantes do que aqueles que estão mais distantes, ou seja, os valores medidos mais próximos ao local de previsão terão maior influência sobre o valor previsto, admitindo uma influência que diminuirá com a distância.

A expressão matemática do *Inverse Distance Weighting* (IDW) é dada pela equação,

$$\hat{Z}_{(s_0)} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{(s_i)}, \quad (22)$$

em que, $\hat{Z}_{(s_0)}$ é o valor estimado para cada local s_0 , N é o número de pontos observados, λ_i são os pesos atribuídos a i -ésima localidade e $Z_{(s_i)}$ é o valor observado.

O peso é determinado pelas seguintes equações (23) e (24):

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}}, \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1. \quad (24)$$

Quando a distância torna-se maior, o peso é reduzido a um fator p . Sendo d_{i0} a distância entre o local de previsão s_0 , e os locais medidos s_i . Os pesos serão dimensionados de forma que a sua soma será igual a 1

5 Resultados e Discussão

A média da velocidade escalar do vento interpolada (Figura 11a) a partir da velocidade escalar média global das observações para cada ponto de grade do NE do Brasil está entre 1,8 e 6,4 m/s a 10m, apresentando de acordo com a escala Beaufort ventos definidos como de ar leve até ventos fortes, variando de acordo com a orografia da região. Percebe-se também através da média que há um limiar dividindo os ventos mais fortes próximos ao litoral, dos ventos mais calmos no Meio-Norte, esse limite predomina no Sertão da Região. A presença do Planalto da Borborema que faz com que os ventos percam velocidades chegando mais fraco no Oeste da região. Na Figura 11b nota-se que a variabilidade dos ventos é maior na faixa litorânea onde há ventos mais fortes, favorecido pelos ventos Alísios de leste e as brisas terrestre e marinha.

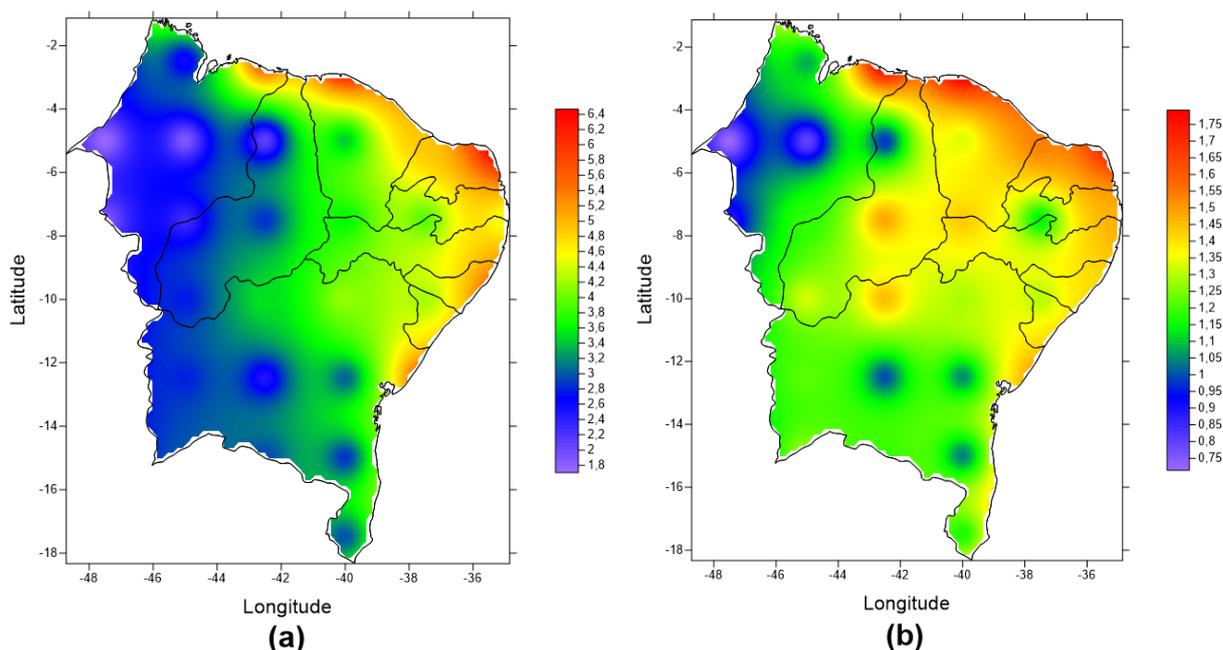


Figura 11: Média (a), desvio padrão (b) da distribuição da velocidade do vento no NE.

Na Figura 12a observa-se o comportamento assimétrico dos ventos, na sub-região da zona da mata os ventos mantêm maior frequência de alta velocidade, apresentando assimetria moderada. Já o Meio-Norte apresenta maior frequência dos ventos mais fracos. Ressalta-se, a presença do limite que descreve o comportamento quase simétrico (mais homogêneo) da distribuição da velocidade do vento do Norte do Maranhão até o Sudeste da Bahia. Na Figura 12b a curtose demonstra um

domínio da distribuição de velocidade do vento de forma heterogênea, ou seja, há muitas variações do vento, definida como platicúrtica. Na parte Oeste a oscilação aumenta pouco, com destaque na divisa entre o Maranhão e o Piauí que tem um acréscimo relevante (curva mesocúrtica).

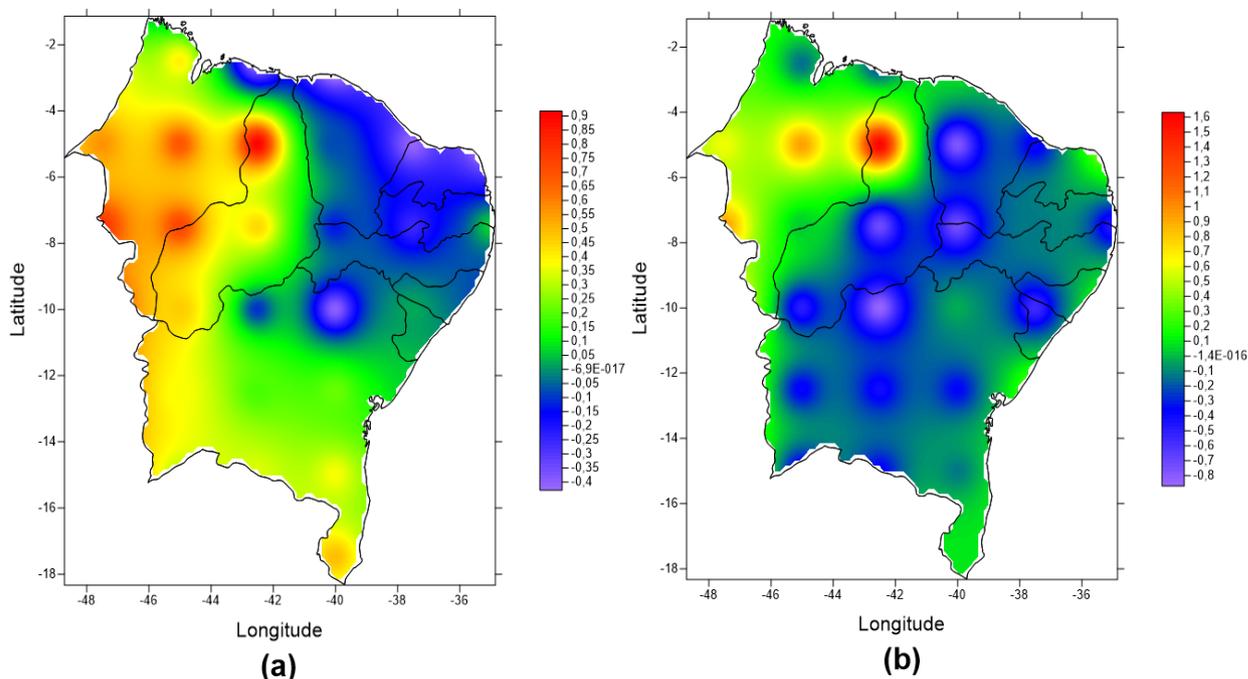


Figura 12: Assimetria (a) e curtose (b) da velocidade do vento no NE.

Partindo do pressuposto que a partir de uma amostra pode-se fazer inferências de toda a população (SILVA, 2007), foram realizados os teste de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS) e Qui-Quadrado (χ^2) com amostra aleatória de 1000 observações da população em estudo com mais de 60 mil observações, considerando o nível de significância de 5% para testar a hipótese de nulidade dos dados seguirem uma determinada função de distribuição. Na Tabela 2, verifica-se apenas o p -valor igual ou maior que 5% obtidos pelo teste KS para as distribuições que tiveram melhor ajustes, ratificando estudos realizados na região por meio de bancos de dados diferentes (SILVA, 2004; SILVA et al., 2002). Percebe-se então, que a $W - 3P^*$ é a distribuição que melhor se ajusta aos dados analisados de acordo com o p -valor encontrado para o teste KS . A $W - 2P$ também tem uma boa aderência, já a distribuição GG tem a menor representação, porém apresenta um domínio sobre áreas com ventos mais fracos localizados em áreas mais distantes do litoral.

Tabela 2: p -valor do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para as distribuições de probabilidade ajustadas.

Lat.	Long.	Dist.	KS	Lat.	Long.	Dist.	KS	Lat.	Long.	Dist.	KS
0	-50	GG	0,17	-10	-47,5	GG	0,42	-15	-40	W-3P*	0,54
0	-47,5	W-3P*	0,75	-10	-47,5	W	0,13	-15	-40	W	0,49
0	-45	W-3P*	0,72	-10	-45	GG	0,06	-15	-37,5	GG	0,09
0	-42,5	W-3P*	0,80	-10	-45	W-3P*	0,11	-15	-37,5	W-3P*	0,05
0	-40	W-3P*	0,68	-10	-45	W	0,12	-15	-37,5	W	0,10
0	-37,5	W-3P*	0,75	-10	-40	W-3P*	0,66	-15	-35	W-3P*	0,19
0	-35	W-3P*	0,47	-10	-37,5	GG	0,12	-15	-32,5	W-3P*	0,33
0	-32,5	W-3P*	0,88	-10	-37,5	W-3P*	0,56	-17,5	-50	W-3P*	0,14
-2,5	-47,5	W	0,09	-10	-37,5	W	0,09	-17,5	-50	W	0,10
-2,5	-47,5	W-3P*	0,15	-10	-35	W-3P*	0,71	-17,5	-47,5	GG	0,24
-2,5	-45	GG	0,07	-10	-35	W	0,75	-17,5	-45	GG	0,50
-2,5	-45	W-3P*	0,28	-10	-32,5	W-3P*	0,91	-17,5	-45	W-3P*	0,19
-2,5	-45	W	0,22	-10	-32,5	W	0,75	-17,5	-45	W	0,15
-2,5	-42,5	W-3P*	0,40	-12,5	-50	W-3P*	0,24	-17,5	-42,5	GG	0,39
-2,5	-40	W-3P*	0,86	-12,5	-50	W	0,22	-17,5	-42,5	W-3P*	0,53
-2,5	-37,5	W-3P*	0,93	-12,5	-47,5	GG	0,15	-17,5	-40	GG	0,26
-2,5	-32,5	W-3P*	0,07	-12,5	-45	GG	0,13	-17,5	-40	W-3P*	0,11
-5	-45	GG	0,55	-12,5	-45	W-3P*	0,12	-17,5	-37,5	W-3P*	0,16
-5	-45	W-3P*	0,36	-12,5	-45	W	0,15	-17,5	-37,5	W	0,09
-5	-45	W	0,19	-12,5	-42,5	W-3P*	0,48	-17,5	-35	W-3P*	0,37
-5	-42,5	W-3P*	0,15	-12,5	-42,5	W	0,41	-17,5	-35	W	0,15
-5	-42,5	W	0,10	-12,5	-40	GG	0,07	-17,5	-32,5	W-3P*	0,58
-5	-35	W-3P*	0,57	-12,5	-40	W-3P*	0,39	-17,5	-32,5	W	0,05
-5	-32,5	W-3P*	0,69	-12,5	-40	W	0,28	-20	-50	GG	0,30
-7,5	-50	W-3P*	0,13	-12,5	-37,5	W-3P*	0,16	-20	-50	W-3P*	0,06
-7,5	-50	W	0,08	-12,5	-37,5	W	0,09	-20	-47,5	GG	0,19
-7,5	-47,5	GG	0,07	-12,5	-35	W-3P*	0,66	-20	-45	GG	0,31
-7,5	-47,5	W	0,06	-12,5	-35	W	0,52	-20	-42,5	GG	0,19
-7,5	-45	GG	0,15	-12,5	-32,5	W-3P*	0,22	-20	-42,5	W-3P*	0,37
-7,5	-42,5	W-3P*	0,06	-15	-50	W-3P*	0,15	-20	-42,5	W	0,34
-7,5	-42,5	W	0,06	-15	-50	W	0,15	-20	-40	W-3P*	0,71
-7,5	-37,5	W-3P*	0,95	-15	-47,5	GG	0,06	-20	-40	W	0,21
-7,5	-37,5	W	0,22	-15	-47,5	W-3P*	0,91	-20	-37,5	W-3P*	0,35
-7,5	-35	W-3P*	0,60	-15	-47,5	W	0,93	-20	-37,5	W	0,10
-7,5	-35	W	0,80	-15	-45	W-3P*	0,53	-20	-35	W-3P*	0,17
-7,5	-32,5	W-3P*	0,54	-15	-45	W	0,48	-20	-35	W	0,12
-7,5	-32,5	W	0,34	-15	-42,5	W-3P*	0,75	-20	-32,5	W-3P*	0,48

*Distribuição que melhor se ajustou aos dados.

Nota-se na Tabela 3 o p -valor obtido através do teste do χ^2 para as funções de distribuições ajustadas e, logo percebe-se que a quantidade de coordenadas ajustadas nas distribuições analisadas foi menor para estatística do χ^2 quando com-

parada ao *KS*. Observando também que, há coordenadas onde os dois testes conseguiram ajustar mais de uma distribuição e outras onde não houve nenhuma aderência ($-5^\circ \times 47,5^\circ$; $-5^\circ \times 40^\circ$; $-5^\circ \times 37,5^\circ$; $7,5^\circ \times 40^\circ$).

Tabela 3: *p*-valor do teste de aderência do Qui-Quadrado para as distribuições de probabilidade ajustadas.

Latitude	Longitude	Dist.	χ^2	Latitude	Longitude	Dist.	χ^2
0	-50	GG	0,13	-12,5	-35	W-3P*	0,18
0	-47,5	W-3P*	0,52	-12,5	-35	W	0,16
0	-45	W-3P*	0,63	-15	-50	W	0,07
0	-42,5	W-3P*	0,24	-15	-47,5	GG	0,13
0	-40	W-3P*	0,11	-15	-47,5	W-3P*	0,86
0	-35	W-3P*	0,83	-15	-47,5	W	0,82
0	-32,5	W-3P*	0,43	-15	-45	W-3P*	0,47
-2,5	-45	GG	0,19	-15	-45	W	0,10
-2,5	-42,5	W-3P*	0,15	-15	-42,5	GG	0,11
-2,5	-40	W-3P*	0,48	-15	-42,5	W-3P*	0,07
-2,5	-37,5	W-3P*	0,80	-15	-40	GG	0,07
-2,5	-35	W-3P*	0,34	-15	-40	W-3P*	0,32
-5	-45	GG	0,29	-15	-40	W	0,42
-5	-42,5	GG	0,10	-15	-37,5	GG	0,07
-5	-35	W-3P*	0,07	-15	-35	W-3P*	0,27
-5	-32,5	W-3P*	0,31	-15	-32,5	W-3P*	0,14
-7,5	-50	GG	0,06	-17,5	-47,5	GG	0,38
-7,5	-42,5	GG	0,05	-17,5	-45	GG	0,76
-7,5	-37,5	W-3P*	0,68	-17,5	-42,5	GG	0,53
-7,5	-37,5	W	0,26	-17,5	-42,5	W-3P*	0,08
-7,5	-35	W-3P*	0,64	-17,5	-40	GG	0,08
-7,5	-35	W	0,64	-17,5	-35	W-3P*	0,70
-7,5	-32,5	W-3P*	0,35	-17,5	-35	W	0,05
-7,5	-32,5	W	0,14	-17,5	-32,5	W-3P*	0,24
-10	-47,5	GG	0,54	-20	-50	GG	0,56
-10	-47,5	W	0,09	-20	-47,5	GG	0,13
-10	-45	GG	0,11	-20	-42,5	GG	0,09
-10	-40	W-3P*	0,35	-20	-42,5	W-3P*	0,23
-10	-37,5	GG	0,22	-20	-42,5	W	0,17
-10	-37,5	W-3P*	0,33	-20	-40	W-3P*	0,85
-10	-35	W-3P*	0,87	-20	-40	W	0,05
-10	-35	W	0,90	-20	-37,5	W-3P*	0,27
-10	-32,5	W-3P*	0,44	-20	-35	W-3P*	0,52
-12,5	-45	GG	0,11	-20	-35	W	0,19
-12,5	-40	W-3P*	0,12	-20	-32,5	W-3P*	0,29
-12,5	-40	W	0,09	-	-	-	-

*Distribuição que melhor se ajustou aos dados.

Os ajustes dos dados são apresentados nas Figuras 14, 15, e 16, através da curva de aderência, representando três dentre as coordenadas que aderiram as funções de distribuições, enfatizando assim os resultados obtidos pelos testes de ajuste nas coordenadas da velocidade do vento na região NE do Brasil. Percebe-se que a GG (Figura 13) se ajusta bem nas coordenadas sobre o Meio-Norte da região, enquanto a $W - 2P$ (Figura 14) adere melhor na faixa litorânea. A $W - 3P$ (Figura 15) tem um bom ajuste por quase toda a área estudada. Logo, verifica-se que há coordenadas em que as três distribuições tiveram bom ajuste e, coordenadas que apenas uma ou nenhuma das distribuições conseguiram aderir.

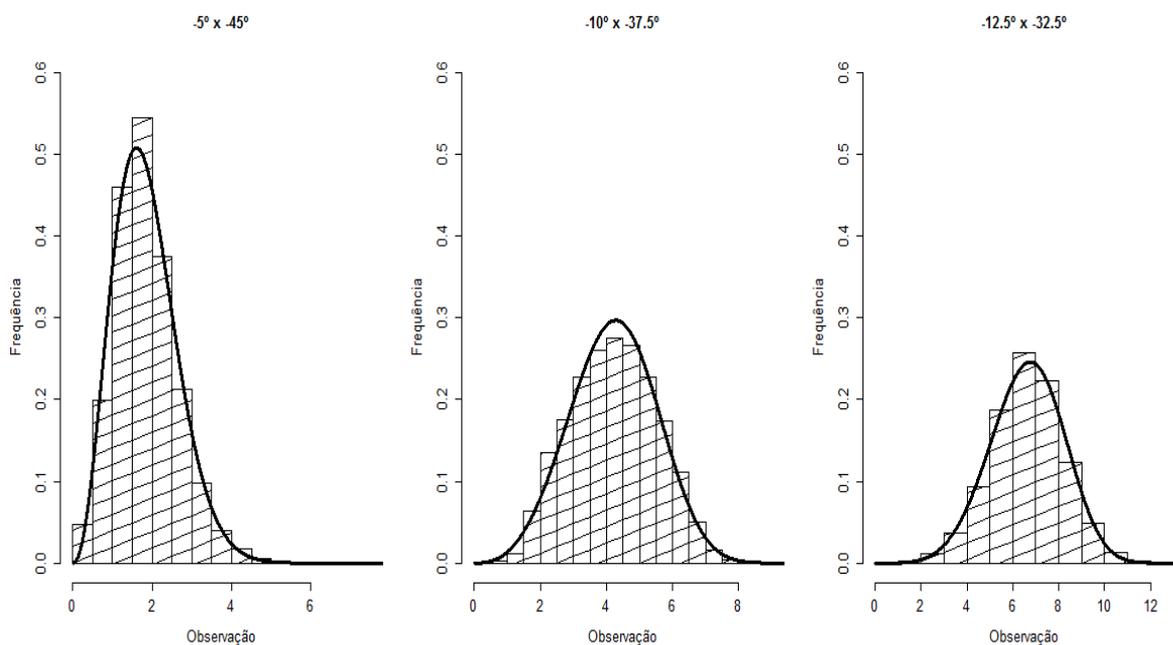


Figura 13: Ajustes da função de distribuição GG .

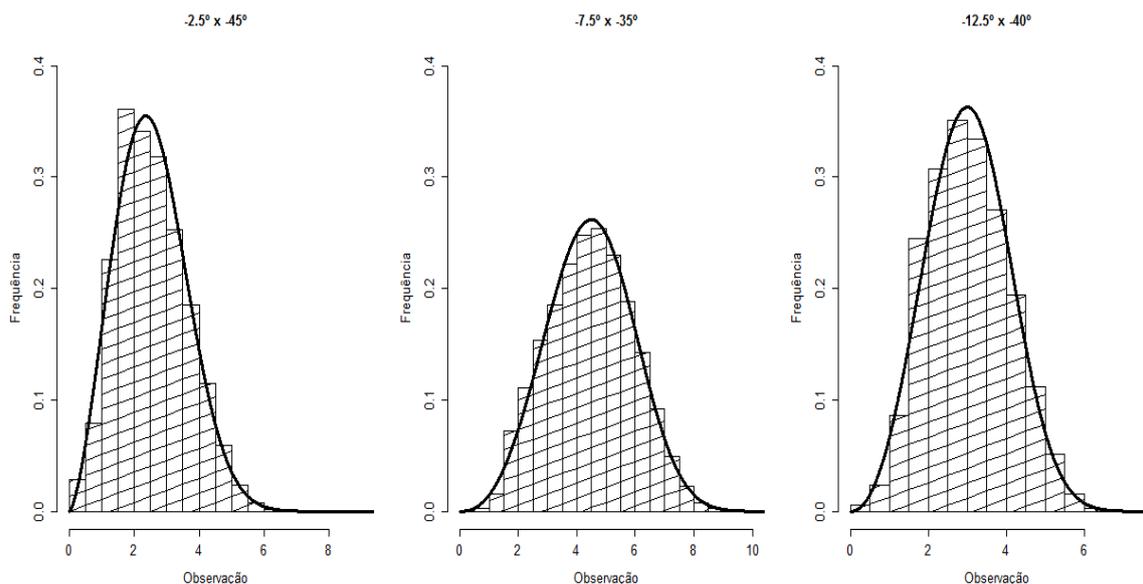


Figura 14: Representação gráfica do ajuste da função de distribuição $W - 2P$.

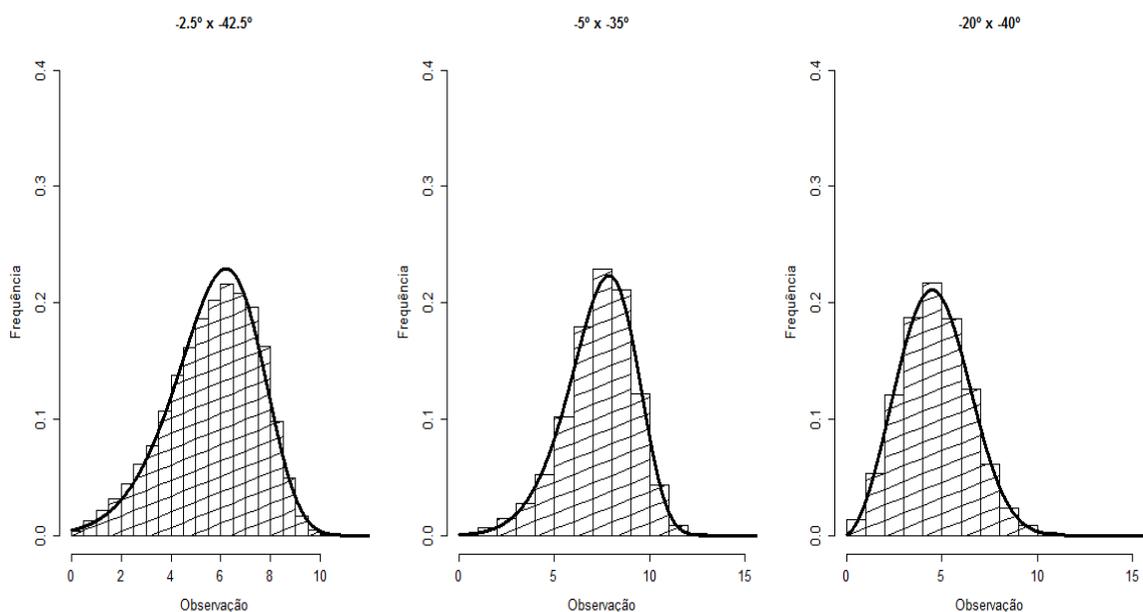


Figura 15: Representação gráfica do ajuste da função de distribuição $W - 3P$.

Na análise espacial do ajuste das distribuições nota-se que a $W - 2P$ (Figura 16a) possui algumas áreas no Sertão e no Meio-Norte em que a distribuição não obteve um bom ajuste, ainda assim, a $W - 2P$ consegue ter um bom ajuste por quase todo NE. Na Figura 16(b) a distribuição $W - 3P$ representa melhor a região do NE, pois abrange quase toda a área, modelando-se a áreas de ventos fracos até os ventos mais fortes nas quatro sub-regiões, que possui características de relevo dis-

tintas. Mas como seu parâmetro de locação assume valores iguais a 0, temos então representado a $W - 2P$. Já a distribuição GG (Figura 16c) não aderiu tão bem quanto as outras distribuições e, apresentando também valores de $\epsilon \equiv 1$ gerando assim a $W - 2P$.

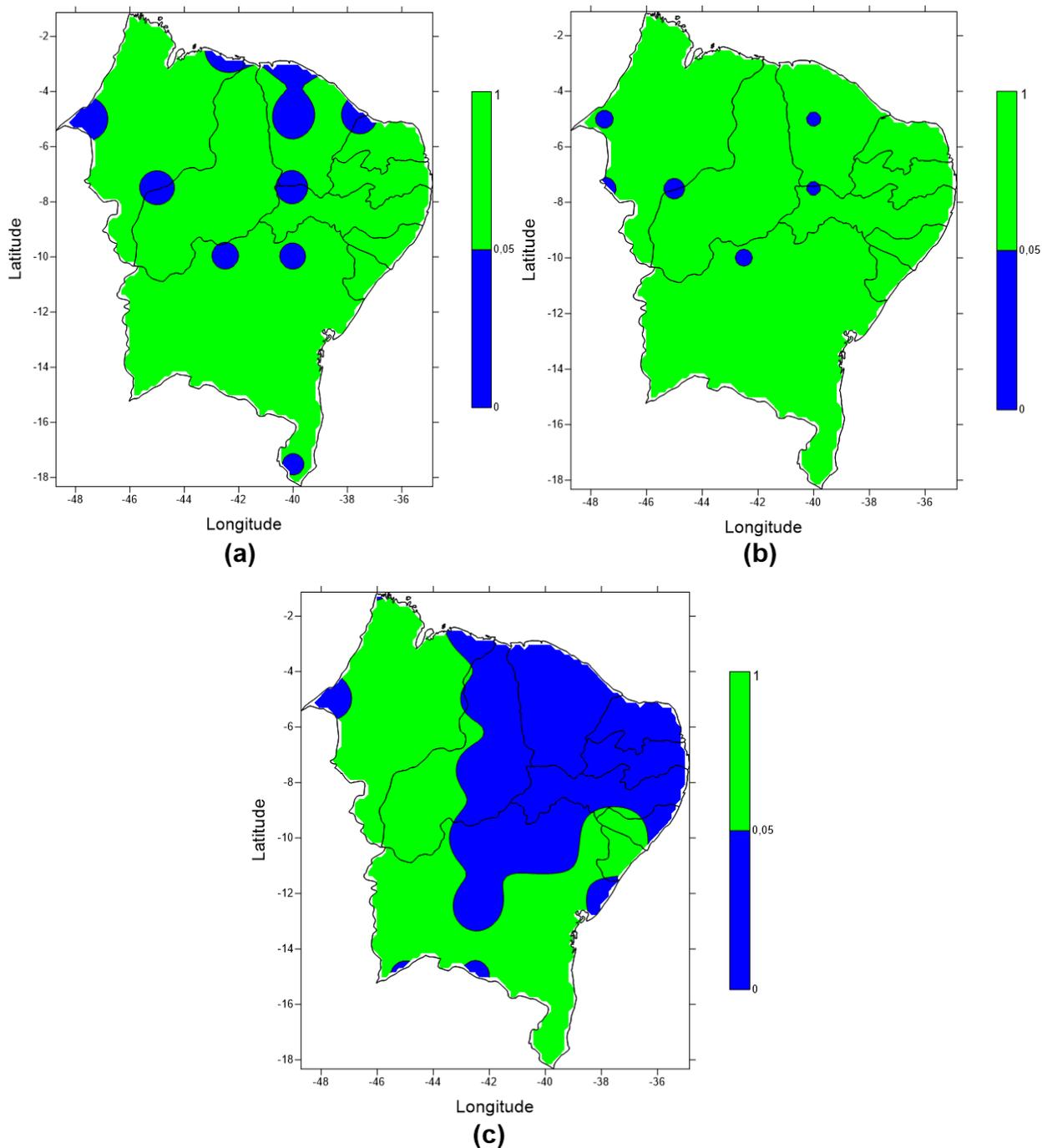


Figura 16: p -valor espacialmente explícito para as funções de distribuições (a) $W - 2P$, (b) $W - 3P$ e (c) GG ajustadas por meio da estatística do KS .

Após identificar as distribuições que melhor se ajustaram aos dados, foram estimados os parâmetros por meio do método da máxima verossimilhança, encontrando o ponto de máximo de cada função. Logo, ao analisar o parâmetro de forma k que indica a maior frequência do vento, tem-se que as condições mais adequadas para ventos intensos e constantes encontram-se nas coordenadas próximo ao Norte a leste do Atlântico para as distribuições GG e W-3P. Enquanto, para $W - 2P$ o parâmetro k mantém frequência mais baixa oscilando entre 2 e 5 m/s em todas as coordenadas. Por meio do parâmetro de escala s_0 , verifica-se os valores mais altos do vento, uma vez que este parâmetro está relacionado com a média da velocidade do vento e abrange as coordenadas de forma similar ao parâmetro de forma (k). O parâmetro ϵ da GG deve ser analisado junto ao de forma k obtendo-se de acordo como os valores encontrados ($\epsilon \equiv 1$), uma $W - 2P$. O mesmo ocorre na $W - 3P$, para o parâmetro $\mu = 0$, origina-se uma $W - 2P$. Diante dos casos expostos para cada distribuição ($W - 3P$ e GG), os parâmetros estimados indicam um melhor ajuste para $W - 2P$.

Tabela 4: Parâmetros estimados das funções de distribuições ajustadas.

Longitude		-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5
Latitude		0	0	0	0	0	0	0	0	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-5	-5
Gama Generalizada	k	2,28	6,68	6,82	7,11	6,78	6,90	7,34	7,24	2,00	2,13	2,36	7,95	8,64	8,15	8,20	8,41	2,31	2,09
	s ₀	2,37	7,37	7,58	8,03	8,01	7,83	7,57	7,30	1,51	1,94	2,71	7,97	9,12	9,17	8,50	8,01	1,61	1,59
	ε	1,47	0,44	0,48	0,49	0,51	0,46	0,40	0,38	1,68	1,37	1,12	0,32	0,33	0,36	0,35	0,33	1,25	1,38
Weibull	k	2,84	3,87	4,22	4,42	4,35	4,13	3,94	3,75	2,68	2,56	2,53	3,61	3,98	4,04	3,96	3,93	2,64	2,52
	s ₀	2,90	6,15	6,49	6,94	6,94	6,64	6,26	5,94	2,05	2,32	2,87	6,32	7,40	7,54	6,93	6,50	1,81	1,91
Weibull 3P	k	2,86	6,82	7,50	8,02	7,15	7,04	7,30	6,90	2,67	2,58	2,56	7,29	10,67	9,69	10,14	11,33	2,68	2,53
	s ₀	2,92	10,23	10,96	11,97	10,94	10,76	10,91	10,25	2,04	2,34	2,91	11,82	18,17	16,69	16,30	17,06	1,84	1,92
	μ	-0,02	-3,98	-4,38	-4,94	-3,91	-4,03	-4,55	-4,20	0,01	-0,01	-0,03	-5,37	-10,61	-9,01	-9,23	-10,41	-0,02	-0,01

Continuação Tabela 4.

Longitude		-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5
Latitude		-5	-5	-5	-5	-5	-5	-7,5	-7,5	-7,5	-7,5	-7,5	-7,5	-7,5	-7,5	-10	-10	-10	-10
Gama Generalizada	k	1,82	1,53	5,80	7,36	6,22	7,04	2,11	1,70	1,47	2,22	6,21	5,07	3,34	5,08	2,18	1,47	2,10	7,01
	s ₀	1,46	1,39	5,10	6,74	8,87	8,04	1,68	1,51	1,64	3,52	5,51	4,81	4,95	7,24	1,90	1,42	2,97	5,58
	ε	1,74	1,98	0,36	0,37	0,63	0,53	1,23	1,62	1,77	0,85	0,32	0,67	1,02	1,01	1,15	1,81	1,08	0,26
Weibull	k	2,48	2,23	2,84	3,68	4,67	4,66	2,39	2,23	2,04	2,01	2,76	3,95	3,38	5,11	2,37	2,05	2,20	2,64
	s ₀	2,08	2,32	3,84	5,43	8,03	7,08	1,90	2,11	2,58	3,20	4,05	4,33	4,99	7,26	2,05	2,28	3,11	3,96
Weibull 3P	k	2,47	2,23	3,45	6,86	7,17	9,02	2,41	2,22	2,03	2,00	3,77	4,87	3,25	5,79	2,39	2,05	2,19	3,15
	s ₀	0,01	2,32	4,53	9,50	11,92	13,02	1,91	2,11	2,58	3,19	5,26	5,24	4,09	8,15	2,07	2,27	3,10	5,01
	μ	0,01	0,00	-0,06	-3,97	-3,82	-5,86	-0,01	0,01	0,00	0,01	-1,13	-0,88	0,17	-0,88	-0,02	0,01	0,01	-0,98

Continuação Tabela 4.

Longitude		-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5
Latitude		-10	-10	-10	-10	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-15	-15	-15	-15	-15	-15
Gama Generalizada	k	6,17	3,63	3,86	4,07	1,78	1,45	2,42	3,23	2,65	3,11	3,61	4,00	1,78	1,86	2,70	2,39	2,11	2,50
	s ₀	5,54	4,69	5,87	6,54	1,67	1,54	3,13	3,13	2,97	5,21	6,11	6,68	1,61	1,75	3,58	3,01	2,30	4,81
	ε	0,46	1,00	1,50	1,47	1,51	1,87	1,00	0,74	1,33	1,67	1,41	1,30	1,48	1,48	0,88	1,18	1,80	1,66
Weibull	k	3,69	3,62	4,86	5,09	2,25	2,06	2,43	2,68	3,15	4,14	4,41	4,66	2,23	2,33	2,49	2,64	2,95	3,33
	s ₀	4,61	4,68	6,64	7,32	2,20	2,53	3,13	2,77	3,38	6,31	6,85	7,23	2,09	2,26	3,37	3,28	3,18	6,10
Weibull 3P	k	6,11	4,87	4,83	5,07	2,24	2,05	2,44	2,86	3,11	4,08	4,40	4,78	2,22	2,33	2,54	2,64	2,92	3,32
	s ₀	7,22	5,24	6,60	7,30	2,19	2,52	3,14	2,93	3,34	6,23	6,83	7,41	2,09	2,25	3,42	3,28	3,15	6,09
	μ	-2,54	-0,88	0,04	0,03	0,00	0,01	-0,01	-0,14	0,04	0,08	0,01	-0,17	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,03	0,01

Continuação Tabela 4.

Longitude		-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5	-50	-47,5	-45	-42,5	-40	-37,5	-35	-32,5
Latitude		-15	-15	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Gama Generalizada	k	3,69	4,23	1,86	1,61	2,03	2,16	1,90	2,97	3,77	4,06	1,73	1,65	1,67	2,24	2,78	3,66	3,80	3,78
	s ₀	6,50	7,14	1,89	1,82	2,27	2,12	2,27	5,93	6,87	7,16	1,99	1,81	1,73	1,81	5,22	7,21	7,22	7,16
	ε	1,06	0,94	1,54	1,85	1,43	1,44	1,87	1,12	0,84	0,78	1,74	1,76	1,90	1,28	0,99	0,73	0,71	0,71
Weibull	k	3,82	4,07	2,38	2,28	2,50	2,68	2,72	3,17	3,38	3,50	2,37	2,28	2,40	2,59	2,77	3,01	3,08	3,06
	s ₀	6,62	7,01	2,49	2,83	2,80	2,60	3,32	6,20	6,46	6,62	2,89	2,69	2,68	2,07	5,20	6,44	6,42	6,36
Weibull 3P	k	4,10	4,62	2,37	2,26	2,50	2,69	2,71	3,29	3,83	4,06	2,36	2,28	2,37	2,60	2,87	3,45	3,59	3,56
	s ₀	7,07	7,86	2,49	2,81	2,81	2,60	3,31	6,42	7,22	7,57	2,88	2,69	2,66	2,08	5,37	7,25	7,34	7,25
	μ	-0,43	-0,82	0,00	0,02	0,00	-0,01	0,01	-0,21	-0,73	-0,91	0,01	0,00	0,02	-0,01	-0,15	-0,76	-0,87	-0,83

Através da análise espacial da estimativa dos parâmetros da $W - 2P$ (Figura 17a) pode-se ver que o parâmetro de forma k atinge valores maiores, indicando uma maior frequência da velocidade do vento próximo à planície litorânea. Nota-se também uma fronteira que delimita valores inferiores com maiores oscilações do vento. O parâmetro s_0 (Figura 17b) representa maiores estimativas da velocidade do vento do Norte do Maranhão até Leste da Bahia, e índices menores na parte Oeste do NE.

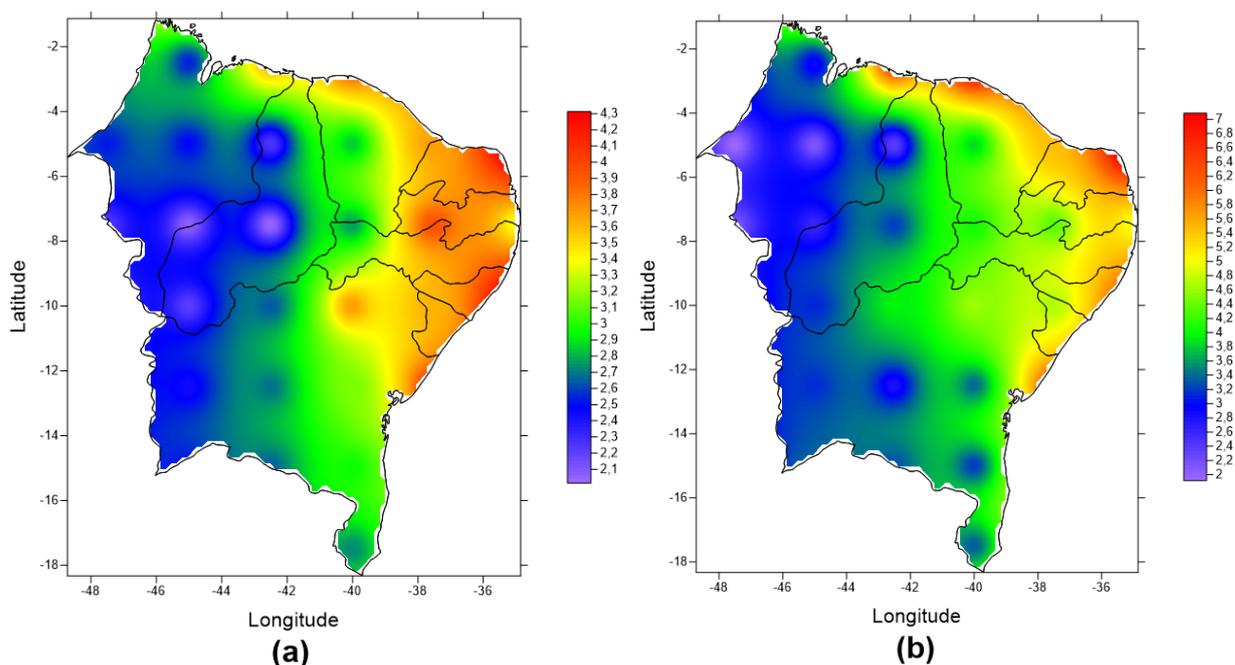


Figura 17: Parâmetro de forma k (a) e escala s_0 (b) da distribuição $W - 2P$ espacialmente explícito.

Os parâmetros da $W - 3P$ mostram um comportamento pouco semelhante entre os parâmetros de forma k (Figura 18a) e escala s_0 (Figura 18b), indicando índices mais altos de velocidades constantes na região. Embora a velocidade diminua, ela mantém-se constante, com pequenas oscilações em uma menor área do NE. Ressaltando sempre a fronteira entre a parte Oeste e leste do NE, que abrange o Sertão com a presença de relevo como a Chapada do Araripe entre o Piauí, Maranhão e o Ceará e a Chapada da Diamantina no centro da Bahia com altas altitudes que gera ventos mais fortes na parte leste, mas são também barreiras naturais fazendo com que os ventos percam força e cheguem mais fracos na parte Oeste. Na Figura 18c, o parâmetro de locação assume valores iguais a zero, originado uma distribuição $W - 2P$.

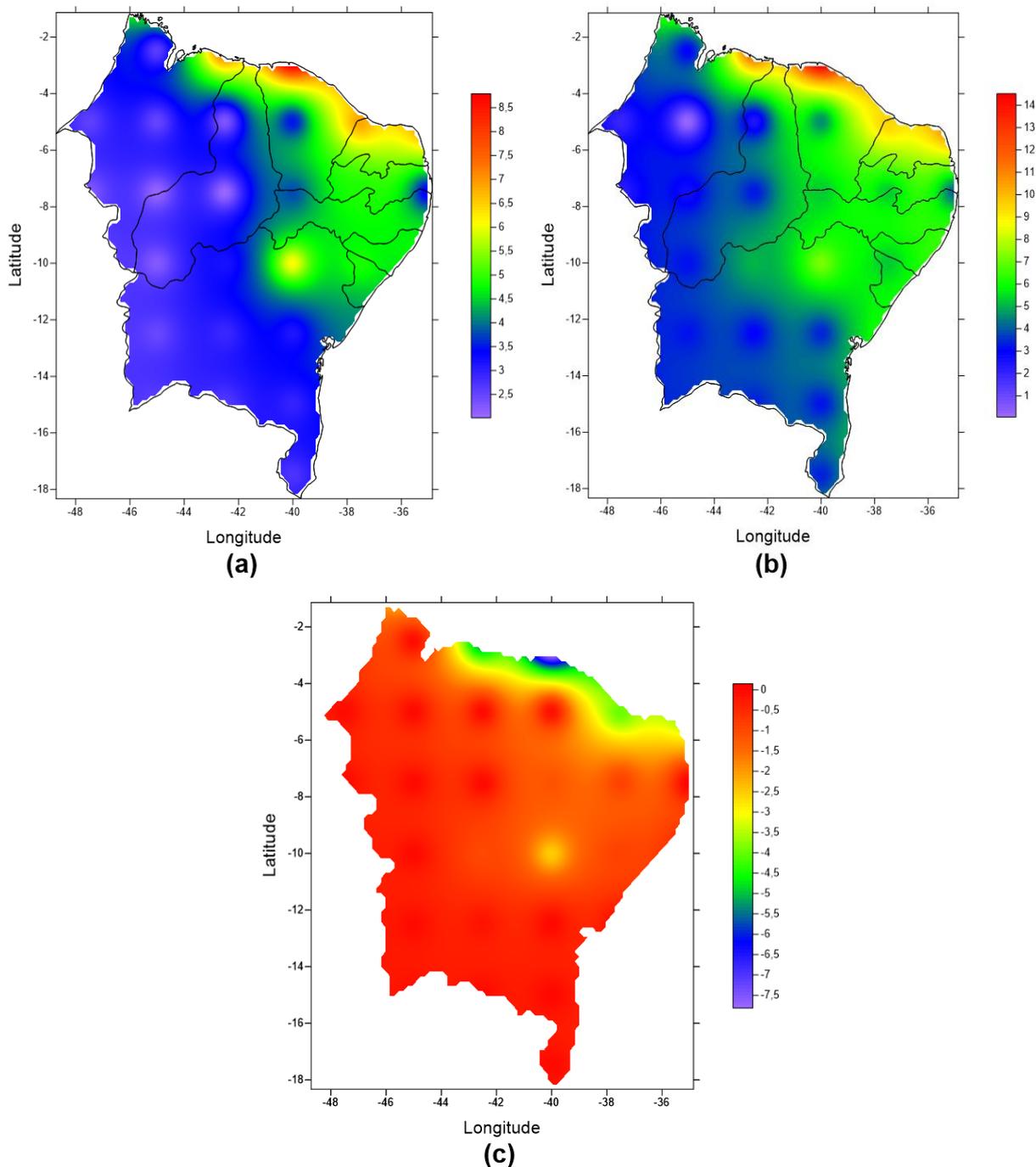


Figura 18: Parâmetro de forma k (a), escala s_0 (b) e localização (c) da distribuição $W - 3P$ espacialmente explícito.

Observa-se na Figura 19, os parâmetros da GG que apresenta uma variabilidade maior na velocidade do vento (Figura 19a) no Norte do Atlântico, com a presença de ventos mais fracos (Figura 19b) desde a parte Oeste do Maranhão até o sul da Bahia. O parâmetro ϵ (Figura 19c) apresenta uma escala com valores menores que influência no parâmetro k , sendo que ao assumir o valor igual a 1 obtêm a

$W - 2P$, verificando esse valor em uma faixa que nasce no Norte Maranhão passando pelo sul da Bahia e envolve parte da faixa litorânea.

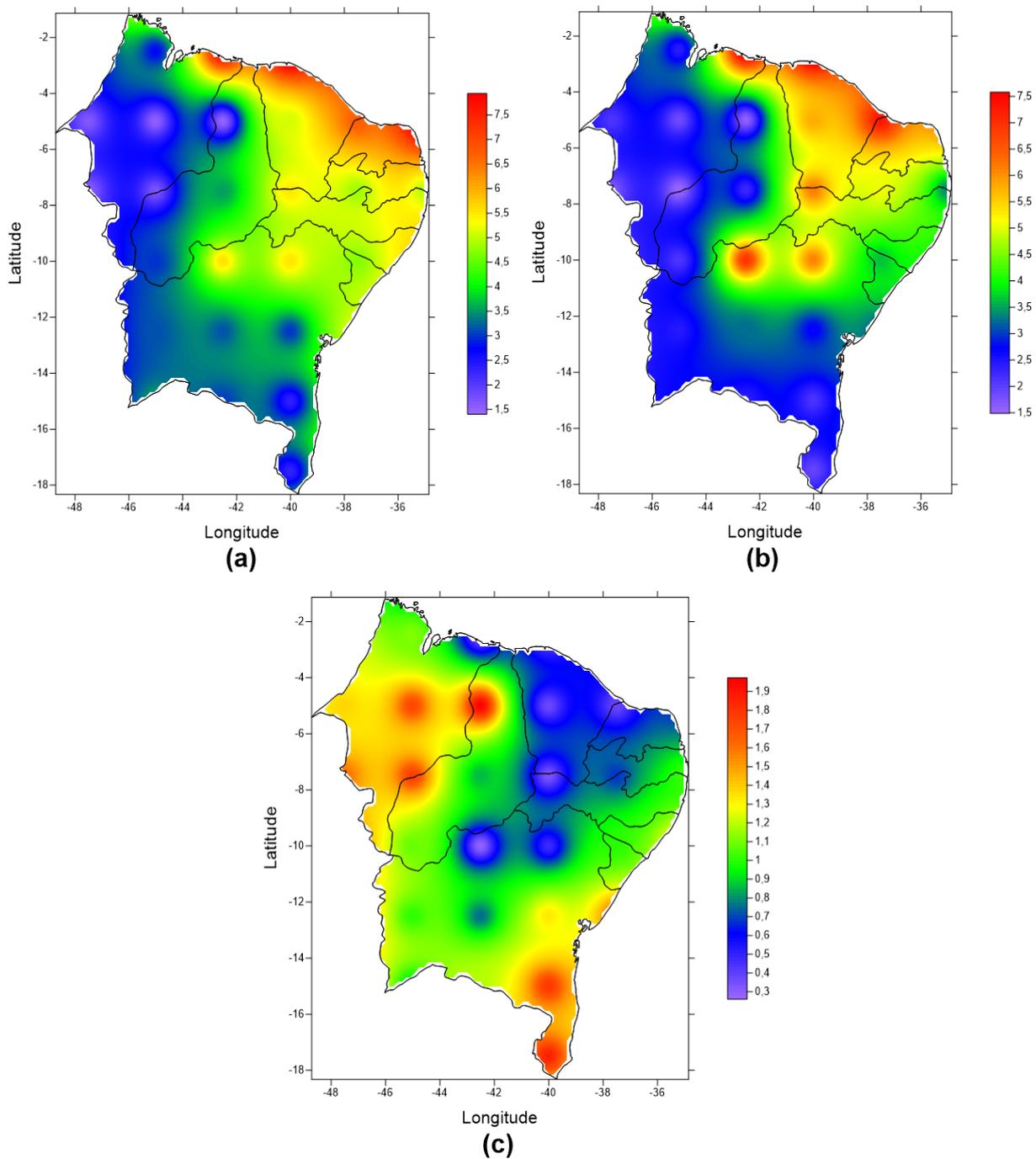


Figura 19: Parâmetro de forma $k(a)$ e escala $s_0(b)$ e flexibilidade da forma $\epsilon(c)$ da distribuição GG espacialmente explícito.

6 Conclusão

Os dados da ERA-40 sobre a velocidade do vento no NE do Brasil compreendendo um período de 44 anos com quatro registros diários nas principais horas sinóticas. Obteve-se assim, a velocidade escalar s para cada ponto de grade e foram identificadas as funções de distribuição de probabilidade que melhor se ajustavam aos dados. Diante dos resultados encontrados têm-se que $W - 2P$ é a distribuição que melhor representa as características do comportamento do vento no NE brasileiro. Apesar da $W - 3P$ mostrar-se adequada, o valor de seu parâmetro de locação $\mu = 0$, origina a $W - 2P$ em grande parte da Região. Fato semelhante ocorre com a GG (quando $\epsilon \equiv 1$) em algumas coordenadas implicando também na $W - 2P$. Tais resultados comprovam os estudos realizados na Região (AMARANTE et al., 2001), podendo assim, trabalhar com um modelo mais fácil ($W - 2P$), do que com modelos mais complexos (GG e a $W - 3P$). A Chapada do Araripe e da Diamantina, o Planalto da Borborema e a Zona da Mata com constância de ventos destacam-se por serem regiões com altos índices de velocidade do vento e maior variabilidade a 10m do solo. O Oeste do NE abriga os ventos com comportamento mais calmos e com poucas oscilações.

Desta forma, o objetivo do trabalho foi alcançado ao avaliarmos que a $W - 2P$ é a função de distribuição de probabilidade que melhor descreve a velocidade do vento no NE, implicando que quanto maior o parâmetro de forma k maior é a frequência dos ventos na região, e quanto maior o parâmetro de escala s_0 maior será a velocidade escalar dos ventos. Os resultados podem ser usados para avaliar o potencial eólico do NE e, a influência do vento sobre vários fenômenos ambientais, como erosão do solo, precipitação, formação de dunas e dispersão de sementes e poluentes.

Para trabalhos futuros sugere-se verificar o ajuste das funções de distribuição de probabilidade de acordo com os meses do ano, as estações. Assim como, estudar a influência das componentes nas distribuições. Aplicar as técnicas utilizadas para estudo da velocidade de vento em outras variáveis climáticas tais como: temperatura, umidade, radiação solar, precipitação, dentre outras. Outro estudo que poderá ser feito, é a utilização do método de interpolação de Kriging na análise espacial dos dados.

7 Referência

AMARANTE, O. A. C. DO et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas_do_Potencial_Eolico_Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2013.

ANEEL, A. N. DE E. E. Energia Eólica. In: **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ARAÚJO, A. J. de. **Análise da Correlação Temporal em Séries de Velocidade e Rajada do Vento do Nordeste**. Dissertação de Mestrado. UFRPE. Agosto, 2012.

AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, B. B. DA; RODRIGUES, M. F. G. Previsão estatística das chuvas de outono no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 1, p. 19–30, 1998.

BOLFARINE, H.; SANDOVAL, M. **Introdução à inferência estatística**. 2^a. ed. SBM, 2010.

CARTA, J. A.; RAMÍREZ, P.; VELÁZQUEZ, S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 933–955, jun. 2009.

CARVALHO, S. **Análise bioclimática como ferramenta para implementação do Plano Diretor do Campus Central da UFRN**. UFRN, 2005.

CORREIA, A. A.; SILVA ARAGAO, M. R.; BRAGA, C. C. **Padrões de variabilidade temporal das componentes do vento à superfície no Nordeste do Brasil** Rio de Janeiro XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, , 2000.

CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/imprimir/22551>>. Acesso em: 20 maio. 2013.

DRUCK, S. et al. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. EMBRAPA, 2004.

ECMWF. **European Centre for Medium-Range Weather Forecasts**. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/>>. Acesso em: 2 ago. 2013.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. DA S. PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL E A INFLUÊNCIA DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO NO CLIMA DA REGIÃO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15–28, 2005.

GRUBB, M. J.; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: **Renewableenergy: sources for fuels and electricity**. Washington: Island Press, 1993.

HENNESSEY, J. P. Some Aspects of Wind Power Statistics. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 2, p. 119–128, fev. 1977.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/informacoes/glossario/glossario.html>>. Acesso em: 6 jun. 2013.

JOHNSON, R. A. **Probability and statistics for engineers**. 8. ed. United States of America: [s.n.]. p. 1–784

JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; YALCIN, A. Nationwide assessment of potential output from wind powered generators. **Journal of Applied Meteorology**, v. 15, n. 7, p. 673–678, 1976.

KAWABATA, T. et al. A Cloud-Resolving 4DVAR Assimilation Experiment for a Local Heavy Rainfall Event in the Tokyo Metropolitan Area. **Monthly Weather Review**, v. 139, n. 6, p. 1911–1931, jun. 2011.

KHODABIN, M.; AHMADABADI, A. Some properties of generalized gamma distribution. **Mathematical Sciences**, v. 4, n. 1, p. 9–28, 2010.

KISS, P.; JÁNOSI, I. Comprehensive empirical analysis of ERA-40 surface wind speed distribution over Europe. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 8, p. 2142–2151, ago. 2008.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. rev. e ed. UNESP, 2003.

LUO, W.; TAYLOR, M. C.; PARKER, S. R. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 7, p. 947–959, 15 jun. 2008.

MB. **Meteorologia Básica-Departamento Física-UFPR**. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Acesso em: 26 set. 2013.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>>. Acesso em: 9 set. 2013.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. Blucher, 2006.

MOURA, M. et al. **Clima e água da chuva no semi-árido**. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/36534/1/OPB1515.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2013.

OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. A. ESTUDO DE VARIABILIDADE DO VENTO EM ESCALA SAZONAL SOBRE O NORDESTE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 53–66, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 2 ago. 2013.

RAMOS, F. G.; SEIDLER, N. Estudo da Energia para Aproveitamento em Pequenos Empreendimentos. **Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 7, n. 13, 2011.

REBOUÇAS, A. DA C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, abr. 1997.

ROLIM, G. DE S. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, 2007.

ROSA, C. A.; TIAGO FILHO, G. L.. **Eólica**. Itajubá, MG: FAPEPE, 2007.

SANTOS, M. de O.; Stosic, T.; Stosic, B. D. **Long-term Correlations in Hourly Wind Speed Records in Pernambuco, Brazil**. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 391, n. 4, p. 1546-1552, 2012.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. **Proceedings of the 1968 23rd ACM national**, p. 517–524, 1968.

SILVA, B. Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 189–202, 2004.

SILVA, B. B. DA et al. Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 431–439, dez. 2002.

SILVA, G. C. DA. **Estatística Experimental: Planejamento de Experimentos**. Disponível em: <http://www.galileu.esalq.usp.br/arquivos/Plan_Experimentos.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2012.

SILVA, G. **Características de Vento da Região Nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas**. Tese de Doutorado. UFPE, 2003.

SOUZA, I. F.; LUNDGREN, W. J. C.; NETTO, A. O. A. PROBABILIDADES DA PRECIPITAÇÃO MENSAL NO ESTADO DE PERNAMBUCO. **SCIENTIA PLENA**, v. 6, n. 6, p. 1–10, 2010.

STACY, E. A generalization of the gamma distribution. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 33, n. 3, p. 1187–1192, 1962.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva**. São Paulo: Nobel, 1980.

UPPALA, S. et al. ERA-40: ECMWF's 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957–2002. **ECMWF Newsletter**, v. 17, p. 2–21, 2004.

UPPALA, S. M. et al. The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, n. 612, p. 2961–3012, out. 2005.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA**. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>. Acesso em: 10 out. 2013.

YU, Zuwei; TUZUNER, Akiner. **Wind speed modeling and energy production simulation with weibull sampling**. In: Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE. p. 1-6, 2008.